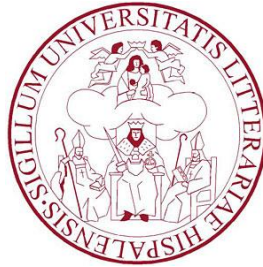


UNIVERSIDAD DE SEVILLA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS 1  
ÁREA DE INSTALACIONES



# Iluminación Natural diseñada a través de la Arquitectura

Análisis lumínico y térmico en base climática de estrategias  
arquitectónicas de iluminación natural

Memoria para optar al grado de Doctor presentada por:

Paula M. Esquivias Fernández  
Arquitecta

Sevilla, 2017

Dirección y co-dirección:  
D. Jaime Navarro Casas  
Catedrático de Universidad  
D. David Moreno Rangel  
Profesor Ayudante Doctor



A...

Esta tesis se la quiero dedicar a todos aquellos que habéis tenido y seguís teniendo, aun no sé porqué, fé en mí, en mi trabajo y en mi capacidad investigadora.

En especial a mi tía Isa, allá donde esté, porque siempre creyó en mí, y supo abrirme ventanas cuando sentía que tenía las puertas cerradas.

A todos aquellos que han sido luz cuando todo era oscuridad.



## Agradecimientos

Tras el arduo trabajo llevado a cabo para la realización de esta tesis doctoral, no puedo dejar de darle las gracias a mi tutor, el profesor D. Jaime Navarro Casas, que no solo me introdujo en el campo de la iluminación natural y me dio un asidero cuando más lo necesitaba, sino que ha sido como un padre para mí en este proceso, tanto por su aliento y su fé en mí como por sus cariñosas riñas y nuestras interesantes conversaciones en relación al desarrollo de este trabajo.

También quería agradecer a mi cotutor, el doctor D. David Moreno Rangel. No solo ha aportado otro punto de vista diferente a esta tesis, más cercana a la práctica arquitectónica, sino que se ha convertido en un hermano académico. Su fé en mi trabajo ha conseguido que no desfallezca en el camino y juntos hemos dejado volar la imaginación para concretarlas en nuevas ideas que han enriquecido este trabajo.

Un agradecimiento muy especial va dirigido a mi familia. Ellos han sabido darme cobertura espacial y temporal para que pudiera centrarme en la escritura de esta investigación, así como el tiempo necesario para el desarrollo de toda la investigación. Entre ellos, un agradecimiento muy especial a mi madre, mi confidente, que me ha apoyado en todas las decisiones que he tomado: desde que decidí dedicarme a la investigación, cuando comencé el máster, comprendiendo todas las vicisitudes con las que me he encontrado durante este tiempo de investigación. Siempre me ha dado un punto de vista práctico y sereno para que pudiera tomar la mejor de las decisiones.

No puede faltar mi agradecimiento a mi grupo de investigación. Con ellos he nacido y crecido como investigadora, aprendiendo de los múltiples proyectos de investigación en los que he podido participar y de los que adquirí la disciplina de la investigación científica. Además, en el área de instalaciones del departamento de Construcciones Arquitectónicas I, nuestra sede, siempre me he sentido como en mi propia casa y siempre he tenido un hueco donde trabajar, pese a no estar vinculada de manera formal a la Universidad de Sevilla.

Agradecerle también al Dr. John Mardaljevic la oportunidad que me dio de poder pasar tres meses aprendiendo a su lado. Cuando me planteé la estancia con este investigador puntero en mi campo, jamás pensé que me aceptaría, por lo que para mí ha sido un sueño el haber estado aprendiendo de un investigador tan prolífico y pionero en la iluminación natural. Gracias a él pude aprender la naturaleza de los indicadores dinámicos de iluminación natural, lo cual ha sido en gran medida el punto de inflexión de esta investigación.

Quisiera agradecer a Steve Fotios y a Jens Christoffersen su iniciativa de crear foros específicos para estudiantes de doctorado en iluminación natural. Gracias a ellos no sólo he podido exponer el avance de mi tesis doctoral ante investigadores internacionales, aprendiendo de ellos y de los comentarios recibidos, sino que también ha contribuido a que forme lazos con otros estudiantes, que serán los investigadores del mañana.

Agradecer también a mis amigos y a mi chico, por estar ahí. En estos seis años de investigación soy consciente de que el estado de mi tesis se ha visto reflejado en mi estado anímico y que ellos nunca han dejado de estar allí para animarme, especialmente aquellos que ya han pasado por este trance, pese a las continuas preguntas de cuándo terminaré.

Por último agradecer a Manuel y a Dori, la nueva avanzadilla, porque al ayudarles a ellos a introducirse en la iluminación natural ha permitido que tenga más claros los nuevos conceptos que estaba desarrollando. Aprendemos de los que nos preceden pero también de quienes nos toman el relevo.

## Summary

Daylighting design today continues to pose major difficulties due to the high number of variables involved. The solutions adopted are also dependent on architectural design decisions regarding final forms and materials which are in turn affected by numerous other factors.

Essentially, the amount of daylight in a building depends on the nature of its spaces and openings, its surrounding environment and its use of elements providing protection against direct sunlight. These same key factors also affect the amount of solar radiation entering the building's spaces and the resulting thermal conditions.

During the course of the 20th century, architectural practice and the science of daylighting largely evolved in parallel and, with only rare exceptions, progressed quite separately. This led to a schism between Architecture and Daylighting: units of measurement were standardized and metrics, models and calculation methods for daylight were developed but these played hardly any role in the process of architectural creation.

Today, at least in Spain, architects are generally unfamiliar with how daylight conditions are calculated for the spaces they design, and do not fully understand the metrics that quantify and express the light levels obtained. Daylight is neglected in architectural planning and buildings are designed without taking into account how the decisions taken affect the interior light environment, partly because architects are simply unaware of their impact. Such a lack of information has made the creation of well-daylit buildings more of an art than a science, with architects relying more on intuition and previous experience than on the study of objective, scientific measurements and metrics of daylight and sunlight in interior spaces.

The situation is aggravated by ever-increasing pressure to meet greenhouse gas emission objectives, a consideration that has generated greater demands to reduce energy consumption in buildings – in part by cutting down on the energy needed by the buildings themselves. In the absence of detailed legislation regarding natural light, the need to comply with an ever-growing number of building regulations has pushed daylighting considerations into the background.

Because of the importance currently attached to energy efficiency in buildings, architects tend to show more interest in daylight as a means of regulating thermal conditions than as a source of natural illumination. But although exploiting daylight can help reduce electric lighting costs, it can also contribute to overheating, resulting in higher energy consumption in cooling.

It should also be pointed out that when the impact of global solar radiation on interior environments is studied in building construction, its heat and light components are invariably considered quite separately: integral analysis of the effects of solar radiation is conspicuous by its absence. Any evaluation of how daylight can impact a building should also take into account its thermal effects. Direct solar radiation entering a space through windows or semi-transparent elements is known as solar heat gain. But in daylighting design, that same radiation is known as insolation. Insolation therefore encompasses both the thermal and lighting-related aspects of the direct solar radiation entering a space.

## Resumen

El diseño de las condiciones de iluminación natural sigue siendo hoy en día una tarea complicada debido a la gran cantidad de variables que intervienen en las mismas, que, además, dependen de las decisiones de diseño del proyecto arquitectónico, sobre el que también intervienen otros muchos factores para llegar a la definición formal y material definitiva.

La iluminación natural de un edificio viene determinada, de forma resumida, por las características de sus espacios y de sus huecos, así como por las condiciones que rodean al edificio y por el empleo de elementos de protección solar. Estos determinantes afectan, también, a la cantidad de radiación solar que entra en los espacios, e influyen en las condiciones térmicas.

Durante el siglo XX, principalmente, la práctica arquitectónica y el desarrollo científico de la disciplina de la Iluminación Natural han seguido rumbos paralelos y desligados, salvo ocasiones puntuales. Esta situación ha desembocado en la ruptura entre la Arquitectura y la Luz Natural. Se han definido y estandarizado las unidades de medida y se han desarrollado los indicadores, los modelos y métodos de cálculo de iluminación natural, pero éstos apenas tienen presencia en el proceso de creación del proyecto arquitectónico.

En el panorama actual, al menos en España, los arquitectos desconocen cómo se calculan las condiciones de iluminación natural de los espacios que están proyectando, los indicadores que expresan los niveles de iluminación obtenidos y su significado. La luz natural no se considera en el proyecto arquitectónico y se diseñan los edificios sin tener en cuenta cómo sus decisiones afectan al ambiente lumínico interior, porque, entre otras cosas, se desconoce su impacto. Esta falta de información lleva a que la creación de edificios bien iluminados naturalmente sea más un arte que una ciencia, se confía más en las intuiciones y en las experiencias previas que en el estudio de medidas e indicadores objetivos y científicos de las condiciones de iluminación natural y soleamiento de los espacios interiores.

A esta situación hay que sumarle la cada vez mayor presión para alcanzar unos objetivos relativos a la emisión de gases de efecto invernadero, que se traducen en unas mayores exigencias para reducir el consumo energético de los edificios, limitando, entre otros, la demanda energética de los mismos. Frente a la ausencia de legislación en torno a la iluminación natural, el cumplimiento de un número cada vez mayor de normativas de edificación, traslada la consideración de la luz natural a un plano marginal.

La situación actual sobre la eficiencia energética de los edificios ha dado lugar a que no se consideren las decisiones de proyecto bajo el prisma de las condiciones de iluminación natural, sino que suelen considerarse para conocer y controlar su incidencia en las condiciones térmicas. Si bien es cierto que la iluminación natural puede reducir el consumo energético de iluminación eléctrica, también puede dar lugar situaciones de sobrecalentamiento de los espacios provocando un aumento del consumo energético en refrigeración.

Por otro lado, cabe destacar que en el ámbito de la edificación, el impacto de la radiación solar global sobre las condiciones interiores se estudia disgregando o separando su componente térmica y su componente lumínica, brillando por su ausencia la consideración integral del efecto de la radiación solar. Para poder evaluar y considerar la influencia de la luz natural sobre los edificios deben considerarse también sus efectos térmicos. La radiación solar directa, entra en un espacio a través de sus huecos o elementos semitransparentes, y se conoce como ganancia solar térmica. Pero esta misma radiación solar directa, en el ámbito de la iluminación natural, se conoce como soleamiento. En este sentido, la insolación integra ambos aspectos, térmico y lumínico, del efecto de la radiación solar directa en un espacio.

Regulatory requirements and technological progress have led to the development of simulation models as the only means of demonstrating compliance with standards. Today's simulation tools play a very important role in analyzing a building's behaviour, since they make it possible to take into account the variability and uniqueness of local climate conditions, expressing the different parameters using metrics which reflect the building's performance over the whole year.

However, these types of tools are usually employed once the building has been erected, or to check final adjustments. They are seldom used as design instruments, mainly because to create a model it is necessary to enter a large amount of information and detail which is not yet available in the early stages of architectural design. Furthermore, one of the principal causes of deficient, or unsuitable, designs is that architects are unable to evaluate daylight meaningfully in its entirety using one single, integratory method - a shortcoming that emphasizes the extent to which the study of daylighting has been neglected in Architecture.

Nevertheless, different methods and procedures do exist today for calculating the amount of daylight at a given point, the hours of solar exposure a space receives and solar heat gain through its perimeter openings. All these values can be obtained from the data entered in standardized climate records, with an hourly or sub-hourly resolution.

Little by little, studies are beginning to appear describing how different design decisions have taken into account daylighting, using innovative simulation technology to analyse and express the results in terms of Dynamic Daylighting Metrics (DDMs).

Their objective, like that of this work, is to provide architects with tools that can offer climate-based information about how design decisions will affect daylighting and that can be applied in the initial stages of the design process.

Those studies, however, do not offer an integral picture of solar radiation as a whole: they focus only on its visible aspect. Considering the global importance and relevance of energy-related issues - something very likely to increase in the coming years - any attempt to reincorporate daylighting into architectural design in a real, effective manner will require information not only about how design decisions affect daylight conditions but also about their effect on heat gain.

To address this problem, a set of experiments was designed aimed at studying the impact of different parameters which contribute to the light conditions in a space. The results of each model were compared and contrasted with those of a reference model.

The information about the daylighting and insolation provided by each variant will constitute a useful aid when taking architectural design decisions at the beginning of the design process, since it offers a better understanding of their impact on interior environmental conditions. This will enrich the design, making it more environmentally aware and, if the information is used to good benefit as a means of lowering energy demand, improving its energy efficiency.



Las exigencias normativas y el desarrollo tecnológico han llevado al desarrollo de modelos de simulación como único medio para justificar el cumplimiento normativo. Las herramientas de simulación hoy en día son especialmente importantes para analizar el comportamiento de un edificio, ya que permiten considerar la variabilidad y particularidad de las condiciones climáticas locales, expresadas mediante indicadores que muestran la evolución anual del comportamiento del edificio.

Sin embargo, el uso de estas herramientas suele llevarse a cabo una vez que el edificio está definido o para probar algunas últimas variaciones, raramente suelen utilizarse como herramientas de diseño, particularmente porque la creación de los modelos requiere de una gran cantidad de datos y detalles que todavía no están definidos en las primeras fases del proyecto arquitectónico. Además, la incapacidad de poder evaluar significativamente la luz natural en su totalidad en un único método integrador es una de las principales causas de decisiones de diseño deficientes o no adecuadas, enfatizando el abandono del estudio de las condiciones de iluminación natural en la Arquitectura.

No obstante, actualmente existen diferentes métodos y procedimientos de cálculo para obtener el nivel de iluminación natural en un punto dado del espacio, las horas de soleamiento que recibe y las ganancias solares que entran en un espacio a través de sus huecos exteriores en función de las condiciones climáticas recogidas en los archivos climáticos estandarizados y con una resolución horaria o sub-horaria.

En esta situación, poco a poco van apareciendo investigaciones donde se aborda el análisis de diferentes decisiones de proyecto sobre las condiciones de iluminación natural en base a los últimos avances de simulación, expresado en términos de los Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs).

Su objetivo, al igual que el objetivo de este trabajo de investigación, es el de proporcionar a los arquitectos unas herramientas que ofrezcan información sobre el efecto de las decisiones de proyecto en las condiciones de iluminación natural en base a las condiciones climáticas locales que puedan ser aplicadas en las primeras fases de proyecto.

No obstante, estos trabajos no aportan una visión integradora de la radiación solar en su conjunto, sólo se centran en su aspecto visible. Siendo conscientes de la importancia y relevancia de los aspectos energéticos en el panorama mundial que se extenderá muy probablemente en los próximos años, si se pretende volver a incorporar la luz natural en el proyecto arquitectónico, y que esta incorporación sea real y efectiva, se debe proporcionar información no sólo de cómo afectan las decisiones de proyecto a las condiciones de iluminación natural, sino también aportar cómo afecta a la carga térmica del espacio.

Para dar respuesta a esta problemática se ha diseñado un conjunto de experimentos donde se ha estudiado el impacto de diversos parámetros involucrados en las condiciones de iluminación de un espacio mediante el análisis comparativo de los resultados de cada modelo respecto a un modelo de referencia.

El análisis de las condiciones de iluminación natural y de insolación que proporciona cada variante supondrá una guía en las primeras fases de diseño a la hora de tomar decisiones de proyecto ya que aportará una mayor información sobre el impacto en las condiciones ambientales interiores y, por ende, el proyecto arquitectónico se enriquecerá y será ambientalmente más consciente, así como energéticamente más eficiente si se aprovecha esta información a favor de un diseño arquitectónico encaminado hacia una menor demanda de energía.

For purposes of systematization and reproducibility, to allow corroboration and validation by the scientific community and ensure the reliability of the results, the experiment had to be very carefully designed, establishing a methodology capable of fully expounding all the resources and procedures involved.

A list of elements that affect the way solar radiation enters through openings or windows and spreads through a space was obtained from the state-of-the-art. These elements were placed in order of progression from the outside to the inside of the architectural space, starting with the solar radiation levels present at the site location (determined by the local climate conditions) and ending with the sizes of the fixed shading devices.

To limit the scope of the experiment, only those elements deemed to be of greatest relevance were selected as parameters for study.

N°	Parameter or series	Independent variable	Number of values
<b>CLIMATE CONDITIONS</b>			
1	Climate conditions	Location	18
<b>SITE POTENTIAL</b>			
2	Surrounding elements	Frontal obstruction angle	6
3	Orientation	Angle of orientation	16
<b>ARCHITECTURAL DESIGN</b>			
<b>DAYLIGHTING ELEMENTS: PERIMETER OPENINGS</b>			
4	Size of opening	Window surface/Façade surface	11
5	Translucency of opening	Visible transmittance	7
6	Position of opening	Position of opening on the facade	9
7	Shape of opening	Opening shape factor	15
8	Segmentation of opening	Segmentation of surface (n° rows x n° columns)	13
9	Distribution of openings	Façade surface segmentation and distribution	8
<b>CONTROL ELEMENTS: SOLAR PROTECTION DEVICES</b>			
10	Overhang	Angle of obstruction	5
11	Vertical fin	Angle of obstruction	9
12	Fixed light shelves	Angle of obstruction	13
<b>TOTAL</b>			<b>130 (118+ref)</b>

Table 1: Summary of studied parameters, independent variables and values.

In the experiment, each parameter corresponded to a calculation series, constituting the independent variable for that series. For each variable, a set of values was established representing the full possible range of values, with each value corresponding to a specific calculation model within its series.

Transversely, a calculation model was defined representing one specific design option in each of the series. This model served as a starting point and a reference. This reference model was common to all the series, so, although the experiment considered 130 architectural design situations, the number of models created was 119 (the reference model and 118 variations of it).

The reference model incorporated not only daylighting requirements as laid down in applicable legislative documents, golden rules and by other international institutions, but also standards regulating thermal envelope requirements.

Para permitir la sistematización y reproducibilidad del experimento y, de esta forma, que pueda ser contrastado y validado por la comunidad científica, asegurando la fiabilidad de los resultados, ha sido necesario un adecuado diseño del experimento así como el establecimiento de una metodología que muestre los medios y los métodos empleados en la ejecución del mismo.

Del estado del arte se ha extraído una relación con los elementos que afectan a la entrada y distribución de la radiación solar en un espacio a través de sus huecos o ventanas. Éstos se han ordenado del exterior al interior del espacio arquitectónico, partiendo de la disponibilidad de radiación solar de la localización del proyecto, marcada por las condiciones climáticas locales, hasta las dimensiones de los dispositivos fijos de protección solar.

Para acotar la extensión del experimento se han seleccionado los que se consideran de mayor relevancia. Estos elementos constituyen los parámetros de estudio.

Nº	Parámetro o serie de estudio	Variable independiente	Número de valores
<b>CONDICIONES CLIMÁTICAS</b>			
1	Condiciones climáticas	Localización	18
<b>POTENCIALIDAD DEL EMPLAZAMIENTO</b>			
2	Elementos del entorno	Ángulo de elevación de la obstrucción frontal	6
3	Orientación	Ángulo de orientación	16
<b>EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO</b>			
<b>ELEMENTOS DE ADMISIÓN DE LUZ NATURAL: LOS HUECOS EXTERIORES</b>			
4	Tamaño de hueco	Superficie de ventana/Superficie de fachada	11
5	Transparencia del hueco	Transmitancia visible	7
6	Posición del hueco	Posición del hueco en la fachada	9
7	Forma del hueco	Factor de forma del hueco	15
8	División del hueco	División de la superficie (nº filas x nº columnas)	13
9	Distribución de los huecos	División de la superficie y distribución fachadas	8
<b>ELEMENTOS DE CONTROL: LAS PROTECCIONES SOLARES</b>			
10	Voladizo	Ángulo de obstrucción	5
11	Saliente lateral	Ángulo de obstrucción	9
12	Dispositivos de lamas fijas	Ángulo de obstrucción	13
<b>TOTAL</b>			<b>130 (118+ref)</b>

Tabla 1: Resumen de parámetros, variables independientes y valores de estudio.

En el experimento cada parámetro se corresponde con una serie de cálculo, siendo dicho parámetro la variable independiente de la serie. Por cada variable se establece un conjunto de valores representativos de la amplitud del rango. Cada uno de estos valores corresponde con un modelo de cálculo dentro de su serie.

Transversalmente se ha definido un modelo de cálculo que representa una opción de diseño concreta en cada una de las series, por lo que aparece en cada una de ellas y sirve de punto de partida y constituye el modelo de referencia. Por tanto, aunque el experimento contempla 130 situaciones de diseño arquitectónico, al tener el modelo de referencia como elemento común a todas las series, en realidad se han creado 119 modelos de cálculo: el modelo de referencia y 118 variaciones del mismo.

En la definición del modelo de referencia no sólo han intervenido los requisitos sobre iluminación natural establecidos por los documentos legislativos, las reglas de oro u otras instituciones internacionales, sino que también se han incluido los requisitos relativos a la envolvente térmica establecidos en la normativa.

Calculation models were created corresponding to each value for each parameter being studied, providing a total of 119 models, and these were simulated in three different internationally validated calculation programs: a dedicated daylighting analysis program (DAYSIM), a dedicated energy analysis program (DesignBuilder) and a third tool which performed environmental calculations and also provided a graphic interface for DAYSIM (Ecotect).

All of these programs are based on internationally recognised, accepted and validated methods and algorithms. Depending on the program in question, the raw data output provided may be expressed in different time scales (yearly, monthly, daily, hourly or sub-hourly), with values corresponding to different dimensional scales (spot, surface or volumetric values).

For each calculation model, natural illuminance and Daylight Factor values were obtained using a dedicated Climate-Based Daylight Modelling (CBDM) program based on the Radiance calculation engine, solar thermal gain through perimeter openings was quantified using a dedicated Thermal Balance measuring program based on the EnergyPlus calculation engine, and complementary values like hours of solar exposure and incident solar radiation were obtained using an ambient environment simulator.

	Files generated	Description
DAYSIM data	«*.ill» «*.daylight_factor.DA»	Annual hourly illuminance profile Daylight Factor
DesignBuilder data	Microsoft Excel workbook «nombremodelo.xlsx». Worksheet: «SHG»	Annual profile of hourly solar gain through perimeter windows
Ecotect data	«*_sunlight.txt» «*_ave hourly radiation.txt»	Total sunlight hours Mean hourly incident solar radiation

Table 2: Simulation software data output

The sets of data provided by each different program varied in their units of measurement, time scales and in the dimensional scales employed, so to compare, correlate and analyse them it was necessary to establish a common framework with common calculation bases and design a processing procedure for the primary data calculations, also taking into account the usual means of expressing results.

With this set-up, we analysed the static and dynamic metrics for daylight (Daylight Factor, Daylight Autonomy and Useful Daylight Illuminance) and for insolation (Sunlight Hours and Solar Gain through perimeter openings) to determine the points they have in common and the calculation bases that set them apart. These differences generally involved the time ranges studied, the dimensional units analysed and the units and magnitudes of measurement used in the metrics.

To provide a comprehensive overview of daylighting and insolation in a space, the calculation process for each metric was broken down as much as possible and a common calculation framework was established in which differences were eliminated while primary data – illuminance and incident solar radiation – was processed. Daylighting and insolation could thus be described in such a manner as to correlate the light and heat values of the solar radiation entering a space.

This common framework for integrating and comparing calculation results provided primary data calculation bases and analysis criteria which in turn made it possible to create new, intercomparable daylight and insolation metrics, adopting the following specifications:

Por cada valor dentro de cada parámetro de estudio se ha creado un modelo de cálculo, dando lugar a un total de 119 modelos, que se ha simulado en tres programas de cálculo diferentes, todo ellos validados internacionalmente: un programa específico de cálculo de iluminación natural (DAYSIM), otro específico para el cálculo energético (DesignBuilder) y un tercer programa de cálculo medioambiental así como de interfaz gráfica para DAYSIM (Ecotect).

Cada programa específico se basa en métodos y algoritmos de cálculo reconocidos, aceptados y validados internacionalmente. Según el programa, la salida de datos o los datos en bruto que proporcionan puede expresarse en diferentes escalas temporales (anuales, mensuales, diarios, horarios o sub-horarios) y los valores pueden corresponder a diferentes escalas dimensionales (valores puntuales, superficiales o volumétricos).

Por cada modelo de cálculo se obtienen valores de iluminancia natural y de Factor de Iluminación Natural, obtenidos mediante la Modelación climática de la Luz Natural (CBDM) utilizando un programa específico basado en el motor de cálculo de Radiance, de ganancia solar térmica a través de los huecos exteriores, mediante un método basado en el método del Balance Térmico utilizando un programa específico basado en el motor de cálculo EnergyPlus, y valores complementarios como las horas de soleamiento y la radiación solar incidente, obtenidos mediante programa de simulación de las condiciones ambientales de la edificación.

Dato de origen	Archivos resultantes	Descripción
Datos DAYSIM	«*.ill» «*_daylight_factor.DA»	Perfil anual de iluminancias horarias Factor de Iluminación Natural
Datos DesignBuilder	Libro de trabajo Microsoft Excel «nombremodelo.xlsx». Hoja: «SHG»	Perfil anual de valores horarios de las ganancias solares a través de las ventanas exteriores
Datos Ecotect	«*_sunlight.txt» «*_ave hourly radiation.txt»	Horas totales de soleamiento Radiación solar incidente media horaria

Tabla 2: Salida de datos de los programas de simulación

Cada conjunto de datos que proporciona cada programa difiere en unidad de medida, escala temporal y escala dimensional de los demás, por lo que para que puedan compararse, correlacionarse y analizarse es necesario establecer un marco común que establezca una base común de cálculo, así como diseñar un procedimiento para el tratamiento de los datos primarios de cálculo, teniendo en cuenta también el medio de expresión habitual de resultados.

Ante dicho panorama, se han analizado los indicadores, estáticos y dinámicos, de iluminación natural (Factor de Iluminación Natural, Autonomía de Luz Natural e Iluminancia Natural Útil) y de insolación (Horas de Soleamiento y Ganancias Solares a través de los huecos exteriores) para determinar cuáles son los puntos que tienen en común y qué bases de cálculo los diferencian. En general éstas se centran en el rango temporal de estudio, la unidad dimensional de análisis y las magnitudes y unidades de medida en que se expresan los indicadores.

Para proporcionar una visión integradora de las condiciones de iluminación natural y de insolación de un espacio se ha descompuesto, en la medida de lo posible, el proceso de cálculo de cada indicador y se ha establecido un marco común de cálculo donde se eliminen las diferencias encontradas y se traten los datos primarios, iluminancia y radiación solar incidente, para que describan las condiciones de iluminación natural e insolación de tal forma que permitan correlacionar la faceta lumínica y térmica de la radiación solar que entra en un espacio.

El marco común de integración y comparación de resultados de cálculo establece unas bases de cálculo y unos criterios de análisis de los datos primarios que han permitido la creación de unos nuevos indicadores de iluminación natural e insolación comparables entre sí. Mediante este marco común se establecen las siguientes determinaciones:

- The time range for the analysis of all primary data (*illuminance, solar gain, sunlight hours* and *incident solar radiation*) covered all the daytime hours in the year (4380 hours), thus discriminating the night-time hours in the year. This way, it was possible to obtain the daylight potential of the space in question. Night-time values were discriminated in the time series for illuminance and solar gain through perimeter openings, so that only those values corresponding to outside daylight availability were analysed.
- Rather than a cumulative analysis at each sensor, which provides no information about the simultaneity of light conditions, an hourly analysis of annual hourly values profiles was performed so that hour-by-hour statistical values could be extracted for the whole workplane as a unitary element. This change provided information about the simultaneity of certain lighting and insolation conditions on the workplane.

Although daylight metrics could be obtained taking the workplane as a unit, this was not possible for solar thermal gain, due to the directionality of incoming solar radiation and many other factors influencing the amount of solar gain through perimeter openings, so its contribution to spatial volume was limited to that of a dimensional unit of analysis.

To answer the questions “How much daylight is sufficient for a given space?” and “How much daylight begins to be uncomfortable?” the following analysis criteria drawn from the state-of-the-art were adopted:

- *Daylight Sufficiency*: according to this criterion, a space can be considered to be sufficiently daylight if 50% of the workplane has a level of daylight of 300 lux 50% of the time range covered in the study.
- *Useful Daylight Illuminance Range depending on visual task*: The range of useful illuminance that constitutes the conceptual basis for the *UD* metric is too wide when there exists a correlation between the level of light and its suitability for visual tasks considering the specific levels of precision required:

Illuminance Range	Level of Precision
0 to 100 lux	None required
100 to 300 lux	Low
300 to 500 lux	Medium
500 to 3000 lux	High
>3000 lux	Very high

Table 3: relationship between lighting level and required level of precision in visual tasks

If the aim is to establish a useful range for performing visual tasks, the levels of precision required in those tasks should be identified, since each one is associated with a specific illuminance range. The useful range (100–3000 lux) was therefore divided into three different ranges – 100 to 300 lux, 300 to 500 lux and 500 to 3000 lux – corresponding to visual tasks requiring a low, medium or high level of precision respectively.

*Excessive Irradiance*: in view of the diversity of values and lack of consensus in the international community, and after having analysed scientific publications, it was established that when vertical irradiance through the window is  $150 \text{ W/m}^2$ , users will experience ambient conditions that, with a fair degree of certainty, will make them get up from their work posts to block the solar radiation entering the space, because of either glare (the most usual reason) or overheating.

- El rango temporal de análisis de todos los datos primarios (*iluminancia, ganancias solares, horas de soleamiento y radiación solar incidente*) abarca todas las horas diurnas anuales (4380 horas), discriminando, por tanto, las horas nocturnas anuales. De forma que se obtiene el potencial de iluminación natural intrínseco al espacio. Se discriminan los valores horarios nocturnos en las series temporales de iluminancia y de ganancia solar a través de los huecos exteriores, de forma que sólo se analizan los valores que corresponden con la presencia de luz natural en el exterior.
- Frente el análisis acumulativo en cada sensor, que no aporta información sobre la simultaneidad de las condiciones de iluminación, se realiza un análisis horario de los perfiles anuales de valores horarios de forma que se pueden extraer valores estadísticos por cada hora de todo el plano de trabajo considerado como un elemento unitario. Este cambio proporciona información sobre la simultaneidad en el plano de trabajo en que se alcanzan determinadas condiciones de iluminación e insolación.

Mientras ha sido posible la obtención de indicadores de iluminación natural basados en el plano de trabajo como unidad, no se ha logrado con las ganancias solares térmicas debido a la direccionalidad de la radiación solar y otros muchos factores que intervienen en la determinación de las ganancias solares a través de los huecos exteriores, por lo que permanece su aportación al volumen espacial como unidad dimensional de análisis.

Para responder a las preguntas: cuánta luz natural es suficiente en un espacio y cuánta empieza a ser molesta, se establecen, en base al estado del arte, unos determinados criterios de análisis:

- *Suficiente Luz Natural*: este criterio establece que se considera que un espacio está suficientemente iluminado naturalmente si el 50% del plano de trabajo alcanza un nivel de iluminación natural de 300 lux durante el 50% del tiempo de estudio considerado.
- *Rango de Iluminancia Natural Útil según la tarea visual*: El rango de iluminación útil que forma la base conceptual del indicador *UDI* resulta demasiado amplio, cuando existe una correlación entre el nivel de iluminación y su idoneidad para el desarrollo de las tareas visuales según su nivel de precisión:

Rango de iluminancias	Nivel de precisión
0 a 100 lux	Sin exigencia
100 a 300 lux	Bajo
300 a 500 lux	Medio
500 a 3000 lux	Alto
>3000 lux	Muy alto

Tabla 3: relación entre el nivel de iluminación y el nivel de precisión de la tarea visual

Si el objetivo es establecer un rango útil para el desarrollo de las tareas visuales, se debería distinguir el grado de precisión de la tarea visual, ya que lleva relacionado un determinado rango de iluminancias. Por ello se ha dividido el rango útil (100–3000 lux) en tres rangos diferentes conforme a tareas visuales de baja, media o alta precisión: de 100 a 300 lux, de 300 a 500 lux y de 500 a 3000 lux.

- *Irradiancia excesiva*: frente a la diversidad de valores y la falta de consenso en la comunidad internacional, a partir del análisis de las publicaciones científicas se establece que cuando a través de la ventana se tiene una irradiancia vertical de 150 W/m<sup>2</sup> el usuario se encuentra en unas condiciones ambientales tales que, con cierto grado de certeza, dejará su puesto de trabajo para bloquear la entrada de radiación solar en el espacio, ya sea por deslumbramiento, principalmente, o por sobrecalentamiento.

This value provides a certain degree of certainty that the occupiers of the space will make use of shading devices to avoid both glare and overheating.

Having established a common framework to integrate calculation bases and implemented the analysis criteria described above, five new metrics were defined:

- *Diffuse Daylight Sufficiency (DSd)*: the percentage of the workplane that simultaneously receives 300 lux of exclusively diffuse daylight 50% of the daytime hours, as quantified in data collected from climate records.
- *Global Daylight Sufficiency (DSg)*: the percentage of the workplane that simultaneously receives 300 lux of global daylight 50% of the daytime hours, as quantified in data collected from climate records.
- *Simultaneous Useful Daylight Illuminance (sUDI<sub>range</sub>)*: a set of 5 metrics showing the percentage of the workplane that simultaneously attains 5 different daylight-only illuminance ranges (<100 lux, 100–300 lux, 300–500 lux, 500–3000 lux and >3000 lux) during the daytime hours, as quantified in data collected from climate records.
- *Excessive Solar Heat Gain (SHGe)*: the percentage of daytime hours in which solar gain through perimeter openings is so high that it represents irradiance on the openings equal to or higher than 150 W/m<sup>2</sup>.
- *Maintained Global Daylight Sufficiency (DSm)*: the percentage of daytime hours in which 50% of the workplane sensors simultaneously receive 300 lux of global daylight, as quantified in data collected from climate records.

After applying the analysis criteria, the new lighting metrics can be expressed as a % of the workplane or a % of hours: that is to say, using unified units of measurement and thus becoming intercomparable.

The metrics created in this piece of research were defined by processing the output data from the software tools and focussing on those criteria which determine the light and heat comfort envelope of the solar radiation entering through perimeter openings, singling out only one variable from the parameters that make up each concept and fixing the values of all the others.

This data processing procedure produced results expressed in different scales, making it possible to obtain research results for each model simulated and each parameter studied, and also global results. Each scale requires a given, representative level of accuracy that will allow the information provided to be processed appropriately.

To present results which make it possible to describe and analyse daylighting and insolation in each of the models, it was therefore necessary to establish a methodology for obtaining and processing the primary data (times series of illuminance and solar gain through windows, Daylight Factor, sunlight hours and annual mean hourly incident solar radiation).



Este valor proporciona una cierta certeza de que los ocupantes actuarán sobre los dispositivos de protección para evitar bien situaciones de deslumbramiento como situaciones de sobrecalentamiento del espacio.

Como consecuencia del establecimiento del marco común de bases de cálculo y de la aplicación de los criterios de análisis se han definido cinco nuevos indicadores:

- *Suficiencia de Iluminación Natural Difusa (Diffuse Daylight Sufficiency -DSd)*: porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente 300 lux durante el 50% de las horas diurnas mediante exclusivamente la componente difusa de la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.
- *Suficiencia de Iluminación Natural Global (Global Daylight Sufficiency -DSg)*: porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente 300 lux durante el 50% de las horas diurnas debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.
- *Iluminancia Natural Útil Simultánea (Simultaneous Useful Daylight Illuminances -sUDI<sub>range</sub>)*: conjunto de 5 indicadores que muestran el porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente 5 rangos diferentes de iluminancia (<100 lux, 100-300 lux, 300-500 lux, 500-3000 lux y >3000 lux) durante las horas diurnas debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.
- *Insolación Excesiva (Excessive Solar Heat Gains -SHGe)*: porcentaje horas diurnas en que se supera una ganancia solar a través de los huecos exteriores tal que suponga una irradiancia sobre los mismos mayor o igual a 150 W/m<sup>2</sup>.
- *Suficiencia de Iluminación Natural Mantenido (Maintained Global Daylight Sufficiency -DSm)*: porcentaje de horas diurnas en que se alcanzan simultáneamente 300 lux en el 50% de los sensores del plano de trabajo debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.

Además, tras la aplicación de los criterios de análisis, los nuevos indicadores de iluminación se expresan como % plano de trabajo o % horas, es decir, bajo unas unidades de medida unificadas, pudiendo estar en disposición de ser comparables entre sí.

Los indicadores creados en este trabajo de investigación son resultado de realizar un tratamiento a la salida de datos de los programas que se basa en unos criterios que determinan los límites del confort lumínico y térmico de la *radiación solar* que entra por los huecos exteriores, de forma que de los parámetros que constituyen cada concepto sólo se deje una variable, fijando los valores de los demás parámetros.

Con este tratamiento de datos se obtienen los resultados que se expresan a diferentes escalas, de forma que se obtienen resultados de investigación de cada modelo simulado, de cada parámetro estudiado y resultados globales de investigación. Cada escala requiere de un determinado nivel de precisión que resulte representativo y permita un adecuado manejo de la información aportada.

Para poder mostrar resultados que permitan describir y analizar las condiciones de iluminación natural e insolación de cada uno de los modelos ha sido necesario, por tanto, establecer una metodología para la obtención y tratamiento de los datos primarios (series temporales de iluminancia y ganancia solar a través de las ventanas, *Factor de Iluminación Natural, horas de soleamiento y radiación solar incidente horaria media anual*).

The descriptive results, expressed mainly in the form of false-colour maps and time charts, were obtained by processing the primary data using the *MATLAB* program to create specific routines. The analytical, individual and group results were obtained by statistically processing the time series of the percentage of the workplane that met prespecified requirements with *Microsoft Excel* to produce line and bar graphs.

The descriptive graphs showing daylighting and insolation in the model and the analytical graphs showing the metrics and their numerical values constitute the materials of this research project.

Descriptive and analytical results were obtained for each calculation model following the methodology explained above. To show the individual results, a set of synthesis-analysis sheets was created. This can be found in Annex B.

Variations between the different metrics, caused when each of the selected study parameters was modified, are shown using the annual values obtained for each model within the corresponding series, and are expressed as a line and bar graph for each calculation series.

Line graphs are used to show the proportional relationship between the results for each metric in each model and the reference model. To aid interpretation, the elements constituting the Simultaneous Useful Daylight Illuminance (sUDI) are separated from the metrics pertaining to *Global, Maintained and Diffuse Daylight Sufficiency (DSg, DS<sub>m</sub> y DS<sub>d</sub>)* and *Excessive Solar Heat Gain (SHGe)*.

These three graphs, together with the annual values for each model in each of the calculation series, constitute the series results. Dispersion graphs for groups of series are also presented, one for each metric. Created from the annual results, these show the variations in the metric in question in the different series that make up the group, and constitute the group, or global, results.

As a means of confirming this study's initial hypothesis, weight factors for each strategy were applied to predetermine the daylighting and insolation values in the reference model, in order to create a more complex reality.

This was done by studying a real case and comparing the results obtained by applying proportionality factors with the results obtained through simulation, thereby confirming the validity of the factors as a predictive instrument that could constitute a tool helpful in calculating light and heat conditions in buildings in the early stages of design, and also in planning refurbishment projects.

Los resultados descriptivos, expresados generalmente mediante mapas de falso color y mapas temporales, se obtienen del tratamiento de los datos primarios en el programa *MATLAB* mediante la creación de rutinas específicas. Los resultados analíticos, individuales y grupales, se obtienen mediante el tratamiento estadístico de las series temporales de porcentaje de plano de trabajo que cumple unos determinados requisitos en el programa *Microsoft Excel*, dando lugar a gráficas de línea y gráficas de barras.

Las gráficas descriptivas de las condiciones de iluminación natural y de insolación del modelo, las gráficas analíticas de los indicadores y sus valores numéricos conforman los materiales de este trabajo de investigación.

Por cada modelo de cálculo se han obtenido resultados descriptivos y analíticos siguiendo la metodología expuesta anteriormente. Para mostrar estos resultados individuales se han elaborado unas fichas de síntesis-análisis que se pueden encontrar en el Anexo B.

Para mostrar la variación de los diferentes indicadores al modificar cada uno de los parámetros de estudio seleccionados, se utilizan los valores anuales obtenidos para cada modelo dentro de la serie correspondiente y se expresa mediante una gráfica de barras y líneas por cada serie de cálculo.

Asimismo, se muestran, en gráficas de línea, la proporción que guardan los resultados de cada indicador en cada modelo respecto al modelo de referencia, separando, para su mayor comprensión, el conjunto que constituye la *Iluminancia Natural Útil Simultánea (sUDI)* de los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural, Global, Mantenido y Difusa (DSg, DSm y DSd)*, y de *Insolación excesiva (SHGe)*.

Esta terna de gráficas, junto con los valores anuales de cada uno de los modelos que forman cada una de las series de cálculo constituyen los resultados de la serie. Además se muestran gráficas de dispersión de grupos de series, una por cada indicador, creadas a partir de los resultados anuales donde se muestra la variación de dicho indicador en las diferentes series que forman el grupo. Estas gráficas constituyen los resultados grupales o globales.

Como medio de comprobación de la hipótesis inicial de esta investigación, se han aplicado los factores de peso de cada estrategia para predeterminar las condiciones de iluminación natural y de insolación aplicados al modelo de referencia para crear una realidad más compleja.

Para ello se ha estudiado un caso real y se han comparado los resultados obtenidos mediante la aplicación de los factores de proporcionalidad y los obtenidos mediante simulación para constatar la validez de los factores como medio predictivo y constituyentes de una herramienta que ayude al diseño del acondicionamiento lumínico y térmico de los edificios en las primeras fases de proyecto, de utilidad también en las operaciones de rehabilitación.



## Índice de Contenidos

<b>1. Introduction   Introducción .....</b>	<b>2 3</b>
<b>1.1 Justificación.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Antecedentes.....</b>	<b>9</b>
<b>1.3 Planteamiento del problema .....</b>	<b>11</b>
<b>1.4 Objetivos generales y específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>1.5 Metodología.....</b>	<b>17</b>
<b>1.6 Estructura del documento .....</b>	<b>21</b>
<b>2. State of the Art   Estado del Arte.....</b>	<b>26 27</b>
<b>2.1 Iluminación Natural en Occidente .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2 Modelos, Indicadores y Métodos .....</b>	<b>61</b>
2.2.1 Radiación solar: Iluminación Natural e Insolación.....	67
2.2.2 Radiación solar visible a través de los huecos.....	69
2.2.2.1 Modelos de cielo .....	71
2.2.2.2 Factor de Iluminación Natural .....	79
2.2.2.3 Exposición solar .....	81
2.2.2.4 Modelación climática de la Luz Natural .....	84
2.2.3 Radiación solar térmica a través de los huecos.....	95
2.2.4 Cálculo computacional.....	99
2.2.4.1 Simulación de iluminación natural .....	101
2.2.4.2 Simulación energética.....	105
2.2.4.3 Comparación y validación .....	110
<b>2.3 Criterios y Recomendaciones .....</b>	<b>115</b>
2.3.1 Reglas de Oro de Iluminación Natural.....	119
2.3.1.1 El entorno .....	119
2.3.1.2 El edificio y sus espacios interiores .....	121
2.3.2 Legislación sobre la radiación solar.....	125
2.3.2.1 Estándares de aplicación voluntaria .....	125
2.3.2.2 Requisito de Habitabilidad .....	128
2.3.2.3 Normativa de Eficiencia Energética.....	141
2.3.2.4 Certificación Medioambiental.....	146
2.3.3 Suficiente Luz Natural.....	147
<b>2.4 Estrategias arquitectónicas .....</b>	<b>149</b>
2.4.1 Condiciones climáticas .....	153
2.4.2 Potencialidad del emplazamiento.....	165
2.4.2.1 Elementos del entorno .....	166
2.4.2.2 Orientación .....	169
2.4.3 El proyecto arquitectónico .....	175
2.4.3.1 Elementos de admisión de luz natural: los huecos .....	178
2.4.3.2 Elementos de control: las protecciones solares .....	194
<b>2.5 Abstract   Resumen del Estado del Arte .....</b>	<b>202 203</b>

<b>3. Methodology   Metodología</b>	<b>220 221</b>
<b>3.1 Diseño del experimento</b>	<b>225</b>
3.1.1 El modelo de referencia	227
3.1.2 Condiciones climáticas	231
3.1.3 Potencialidad del emplazamiento	235
3.1.3.1 Elementos del entorno	235
3.1.3.2 Orientación	236
3.1.4 El proyecto arquitectónico	239
3.1.4.1 Elementos de admisión de luz natural: los huecos	239
3.1.4.2 Elementos de control: las protecciones solares	246
<b>3.2 Medios instrumentales</b>	<b>253</b>
3.2.1 Herramientas de simulación de iluminación natural	255
3.2.2 Herramientas de simulación energética	261
3.2.3 Herramientas auxiliares	263
3.2.3.1 Modelos de simulación y horas de soleamiento	263
3.2.3.2 Tratamiento estadístico de datos	264
3.2.4 Parámetros de cálculo de los programas de simulación	267
3.2.4.1 DAYSIM	267
3.2.4.2 DesignBuilder	269
3.2.4.3 Autodesk Ecotect Analysis	271
<b>3.3 Marco común de integración y comparación</b>	<b>275</b>
3.3.1 Rango temporal	279
3.3.2 Unidad dimensional de análisis	281
3.3.3 Criterios de Iluminación natural e insolación	283
3.3.3.1 Suficiente Luz Natural	283
3.3.3.2 Rango de iluminancias útiles según las tareas visuales	285
3.3.3.3 Irradiancia límite	287
3.3.4 Magnitudes y unidades de medida	291
<b>3.4 Procedimientos y medios de expresión</b>	<b>295</b>
3.4.1 Organización de los datos	297
3.4.2 Medios de expresión	299
3.4.2.1 Resultados descriptivos	303
3.4.2.2 Resultados analíticos	307
3.4.3 Tratamiento de datos	311
3.4.3.1 Resultados descriptivos	313
3.4.3.2 Resultados analíticos	321
<b>3.5 Expresión de los resultados</b>	<b>327</b>
<b>3.6 Aplicación al diseño arquitectónico</b>	<b>337</b>
<b>3.7 Abstract   Resumen de la Metodología</b>	<b>340 341</b>
<b>4. Analysis of Results   Análisis de Resultados</b>	<b>356 357</b>
<b>4.1 Modelo de referencia</b>	<b>359</b>

<b>4.2</b>	<b>Condiciones climáticas .....</b>	<b>367</b>
<b>4.3</b>	<b>Potencialidad del emplazamiento .....</b>	<b>377</b>
4.3.1	Elementos del entorno .....	379
4.3.2	Orientación .....	387
<b>4.4</b>	<b>El proyecto arquitectónico .....</b>	<b>395</b>
4.4.1	Elementos de admisión de luz natural: los huecos.....	397
4.4.4.1	Tamaño del hueco .....	399
4.4.4.2	Transparencia del hueco.....	407
4.4.4.3	Posición del hueco .....	415
4.4.4.4	Forma del hueco.....	423
4.4.4.5	División del hueco .....	429
4.4.4.6	Distribución de los huecos .....	435
4.4.2	Elementos de control: las protecciones solares .....	441
4.4.2.1	Voladizo.....	443
4.4.2.2	Saliente lateral .....	449
4.4.2.3	Dispositivos de lamas fijas .....	455
<b>4.5</b>	<b>Análisis de los indicadores .....</b>	<b>469</b>
4.5.1	Suficiente iluminación natural.....	471
4.5.2	Iluminación Natural Útil simultánea .....	477
4.5.3	Excesiva radiación solar.....	485
4.5.4	Iluminación insuficiente.....	489
<b>4.6</b>	<b>Análisis global .....</b>	<b>491</b>
<b>4.7</b>	<b>Aplicación al diseño arquitectónico .....</b>	<b>499</b>
<b>4.8</b>	<b>Abstract   Resumen del Análisis de Resultados.....</b>	<b>504   505</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusions   Conclusiones .....</b>	<b>510   511</b>
<b>5.1</b>	<b>Nuevos indicadores .....</b>	<b>513</b>
5.1.1	Análisis de los indicadores existentes.....	515
5.1.2	Marco común de cálculo .....	517
5.1.2.1	Rango temporal.....	517
5.1.2.2	Simultaneidad de iluminancias en el plano de trabajo .....	517
5.1.2.3	Radiación solar en el plano de trabajo.....	519
5.1.3	Criterios de análisis .....	521
5.1.3.1	Suficiente Luz Natural .....	521
5.1.3.2	Rango de iluminancias útiles.....	521
5.1.3.3	Irradiancia límite .....	521
5.1.3.4	Nuevos indicadores.....	523
5.1.4	Nueva metodología .....	523
5.1.4.1	Suficiencia de iluminación natural difusa (DSd).....	523
5.1.4.2	Suficiencia de iluminación natural global (DSg) .....	525
5.1.4.3	Suficiencia de iluminación natural mantenida (DSm) .....	527
5.1.4.4	Iluminancia natural útil simultánea (sUDI) .....	527
5.1.4.5	Insolación excesiva (SHGe).....	529

5.1.4.6	Expresión gráfica .....	531
<b>5.2</b>	<b>Impacto de las estrategias arquitectónicas .....</b>	<b>533</b>
5.2.1	Definición y análisis de las estrategias .....	535
5.2.2	Impacto sobre la iluminación natural y la insolación.....	537
<b>5.3</b>	<b>Aplicación al diseño arquitectónico .....</b>	<b>541</b>
Epílogo	.....	545
Figuras	.....	547
Ecuaciones	.....	565
Tablas	.....	567
Ordenes de programación	.....	573
Fuentes bibliográficas.....		575
Acrónimos .....		595
Glosario de términos .....		597
<b>A.</b>	<b>Factor de Iluminación Natural en base climática</b>	
A.1	Antecedentes y Procedimiento.....	A-1
A.2	Características de las localizaciones de estudio .....	A-7
<b>B.</b>	<b>Fichas síntesis-análisis de los modelos de cálculo</b>	
B.0	Modelo de referencia.....	B-1
B.1	Condiciones climáticas.....	B-7
B.2	Elementos del entorno .....	B-77
B.3	Orientación .....	B-99
B.4	Tamaño del hueco .....	B-161
B.5	Transparencia del hueco.....	B-203
B.6	Posición del hueco .....	B-229
B.7	Forma del hueco.....	B-263
B.8	División del hueco .....	B-321
B.9	Distribución de los huecos .....	B-371
B.10	Voladizo .....	B-401
B.11	Saliente lateral .....	B-419
B.12	Dispositivos de lamas fijas.....	B-453



# INTRODUCCIÓN 1

## 1. Introduction

Daylighting is the controlled admission of natural light into a space. The science of daylighting addresses not only how to provide daylight in a space, but also how to do so without causing any undesired side effects. In photometric terms, daylight comprises direct light received from the sun and diffuse light received from the sky. Apart from simply adding windows and skylights to building envelopes, daylighting involves seeking balance between heat gain and heat loss, controlling the degree of glare and allowing for variations in the availability of natural light.

But daylighting design is not only concerned with satisfying the functional need to provide sufficient light with which to perform visual tasks comfortably; historically, it has also had a bearing on the aesthetic and symbolic issues that have characterised and differentiated different periods in the History of Architecture. It is also known to have a positive effect on people's mental and (according to recent research) physical health through its influence on circadian rhythms. Furthermore, mention should be made of its environmental and economic benefits: by reducing artificial light consumption, it helps reduce CO<sub>2</sub> emissions.

In the design phase of a building, daylighting should be analysed from an all-inclusive perspective: daylight in a building is affected by the structure's architectural form, surrounding elements, climate, and the design of the building envelope and the spaces inside it.

Due to a combination of building regulations, daylight calculation methods and the separation of light and heat load analyses, daylighting considerations tend only to be incorporated into architectural design on very rare occasions. However, the appearance of *Climate Based Daylight Modelling (CBDM)* opened the door to a more integrative approach to light and heat simulation, and the resulting changes in standards and environmental requirements has led to a greater integration of daylighting design in Architecture. There is nevertheless still a long way to go in this regard.

This research project examines the nature of daylighting and heat load metrics with a view to creating new metrics that will help integrate both these aspects of solar radiation. It analyses the impact of different architectural factors and strategies associated with the quality and quantity of daylight entering a space, and uses the knowledge acquired to create a daylighting design tool for use in architectural design processes.

## 1. Introducción

La iluminación natural es la admisión controlada de luz natural en un espacio. La ciencia de la iluminación natural no consiste sólo en proporcionar suficiente luz natural en un espacio, sino hacerlo sin incorporar efectos secundarios no deseados. Fotométricamente la luz natural se compone de la luz directa proveniente del sol y de la luz difusa proveniente del cielo. Más allá de añadir ventanas y lucernarios en la envolvente de un espacio, la iluminación natural implica alcanzar un equilibrio entre las pérdidas y ganancias de calor, controlar el deslumbramiento, así como las variaciones en la disponibilidad de luz natural.

La iluminación natural de los espacios no sólo responde a una cuestión funcional de proporcionar luz para desarrollar las tareas visuales en condiciones de confort; históricamente ha respondido también a cuestiones estéticas y simbólicas que han marcado y clasificado las diferentes etapas de la Historia de la Arquitectura. Además se sabe de su efecto positivo en la salud mental y, recientemente, física de las personas a través de su efecto en los ritmos circadianos. Tampoco podemos olvidarnos de su efecto medioambiental y económico al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de la reducción del consumo de iluminación artificial.

La consideración de la iluminación natural en las etapas de diseño de un edificio requiere de un enfoque integrador del mismo: la iluminación natural de un edificio se ve afectada por la forma arquitectónica, los elementos de su entorno, el clima, la configuración de la envolvente y de sus espacios.

El marco normativo, los métodos de cálculo de iluminación natural y la desvinculación del cálculo de su carga térmica configuran un panorama que tiene como consecuencia la no inclusión, salvo en casos excepcionales, del proyecto de iluminación natural en el proyecto arquitectónico. Sin embargo, a partir de la creación de la *Modelación climática de la Luz Natural (Climate Based Daylight Modelling -CBDM)* se han comenzado a acercar posturas entre la simulación lumínica y térmica y se han producido cambios en los requisitos normativos y medioambientales que están provocando una mayor integración del proyecto de iluminación natural en la Arquitectura, no obstante todavía queda mucho camino por recorrer.

Esta investigación ahonda en la naturaleza de los indicadores de iluminación natural, y de su correspondiente carga térmica, para avanzar en la integración de ambos aspectos de la radiación proveniente del Sol mediante la creación de nuevos indicadores. Con ellos se analiza el impacto de diferentes elementos o estrategias arquitectónicas que están íntimamente relacionados con la cualidad y cantidad de iluminación natural de un espacio de forma que su conocimiento sirva como herramienta de diseño para la elaboración del proyecto de iluminación natural del proyecto arquitectónico.



## 1.1 Justificación

La cantidad y calidad de la luz natural en los edificios cambia continuamente debido a los cambios naturales e instantáneos en la trayectoria solar y las condiciones del cielo. Estos cambios se deben a elementos aleatorios como la nubosidad, diarios y estacionales. Para una situación determinada de Sol y cielo, la cantidad y la calidad de la iluminación natural dependen principalmente del diseño arquitectónico [1].

La calidad de la luz natural en la arquitectura determina la percepción de los espacios arquitectónicos así como las condiciones de confort visual; además, afecta a muchas otras cuestiones como la percepción temporal, el estado anímico, la creación de ambientes o la regulación de los ritmos circadianos.

Pero la luz natural en arquitectura no es una cuestión exclusivamente cualitativa; para aprovechar el potencial de la iluminación natural es necesario poder cuantificarla; de esta forma se podrán obtener valores de *iluminancia* que nos permitan gestionar y controlar los requisitos de visibilidad para el desarrollo de tareas visuales. Además, la iluminación natural también tiene un aspecto térmico, en cuanto a que la luz solar directa representa térmicamente a las ganancias solares a través de los huecos en el balance térmico de un espacio.

La mayoría de los elementos que determinan la cantidad y calidad de la iluminación natural de un edificio se definen en las fases de diseño del mismo. Un edificio con unas condiciones de iluminación bien equilibradas es aquel cuya forma arquitectónica proporciona una buena iluminación natural y una adecuada protección solar [1]. Actualmente, la creación de edificios con estas características es más un arte que una ciencia, confiando más en las intuiciones y la experiencia previa del arquitecto que en el estudio de medidas e indicadores objetivos y científicos de las condiciones de iluminación natural e insolación de los espacios interiores.

Por otro lado, la luz natural está relacionada con cuestiones económicas y de eficiencia energética, ya que una adecuada integración de la luz natural puede reducir el uso de la instalación de iluminación artificial, reduciendo su consumo energético y la carga térmica derivada de dicho uso. Sin embargo, si bien la iluminación natural puede reducir el consumo energético de iluminación eléctrica también puede calentar los espacios, reduciendo el consumo energético de calefacción pero pudiendo provocar situaciones de sobrecalentamiento con el consiguiente aumento del consumo energético en refrigeración. Por tanto, para poder evaluar y considerar la influencia de la luz natural sobre la eficiencia energética de los edificios deben considerarse también sus efectos térmicos [1].

El diseño de la iluminación natural generalmente siempre ha tenido un papel secundario y complementario en la arquitectura, prevaleciendo las cuestiones térmicas [2]. Sin embargo, gracias a la capacidad de la luz de generar ambientes y espacios simbólicos, ha sido en los espacios donde tienen lugar actividades ceremoniales y en los edificios religiosos donde tradicionalmente se encuentran diseños arquitectónicos y soluciones formales dirigidas específicamente al control de la iluminación natural [3].

Estos diseños y soluciones nacen, a través de la historia de la arquitectura, mediante la experimentación con los sistemas constructivos propios de cada época y sus limitaciones, recogiendo la sabiduría popular a la hora de incorporar la luz natural a sus espacios interiores junto con el conocimiento de la geometría solar y las intuiciones de los diversos arquitectos y constructores, siendo estas soluciones diferentes en función de las condiciones climáticas exteriores [4].

El desarrollo de las fuentes de iluminación artificial marcó el fin de una época en que la iluminación natural era al menos un condicionante del diseño arquitectónico, incluso cuando no se alcanzaban los valores deseados en la práctica. La generalización y reducción de costes de la iluminación eléctrica supuso la solución para la iluminación de los espacios interiores, eliminando los problemas de la variabilidad de la luz natural, del deslumbramiento y de la excesiva insolación, por lo que también supuso una tendencia a la no consideración de la iluminación natural en el diseño arquitectónico, provocando una despreocupación generalizada por este tema, salvada casi exclusivamente por la presencia de documentos y requisitos normativos, especialmente en los países noreuropeos, exigiendo unas condiciones mínimas de iluminación natural.

Tradicionalmente el estudio de las condiciones de iluminación natural de un espacio se abordaba desde dos vertientes distintas: por un lado el análisis cuantitativo expresado mediante el *Factor de Iluminación Natural (FIN, Daylight Factor -DF)*, que no considera la presencia directa del Sol y cuyo único escenario real posible es bajo un cielo completamente nublado, cuya distribución de *luminancias* da como resultado que dicho factor sea, además, insensible a la orientación del espacio; y por otro, el análisis cualitativo de la presencia solar en el espacio a través del estudio de las sombras arrojadas, en el que la intensidad del Sol no se considera, así como tampoco la luz proveniente de la bóveda celeste [1]. Por tanto, ambas metodologías son, en esencia, incompatibles.

En cuanto al estudio de las condiciones de insolación, es decir, de las cargas térmicas debidas a la acción directa del sol, éste habitualmente forma parte de los análisis energéticos, con un gran desarrollo computacional para obtener valores horarios o sub-horarios en base a unas condiciones climáticas. Esta gran diferencia en la precisión de los valores térmicos y lumínicos ha provocado un distanciamiento progresivo entre el estudio de los efectos térmicos y lumínicos de la radiación solar en la arquitectura.

Además, la importancia de la eficiencia energética de los edificios en la situación actual ha dado lugar a que generalmente en el diseño del edificio prevalezcan criterios encaminados a la reducción de la demanda energética, incluyendo aquellas estrategias arquitectónicas destinadas a bloquear la entrada de radiación solar directa y aquellas que minimicen las pérdidas de calor a través de los elementos semitransparentes del edificio, sin tener en cuenta su impacto sobre las condiciones de iluminación natural de dichos espacios.

Esta realidad ha provocado una desvinculación cada vez mayor entre las cuestiones térmicas y lumínicas de la radiación solar, así como un creciente olvido de las repercusiones que tiene el diseño arquitectónico en las condiciones de iluminación natural que son particularmente sensibles a las características formales y ópticas del espacio. La incapacidad de poder evaluar la iluminación natural en su globalidad, con la precisión con que se realizan los análisis energéticos, en un único método que integre su aspecto térmico y lumínico es una de las principales causas de decisiones de diseño deficientes o no adecuadas para lograr espacios confortables [1].

Bajo un diseño inadecuado de los edificios, serán los usuarios los que traten de controlar las condiciones ambientales interiores, cuyas acciones, generalmente, dan como resultado una muy baja explotación del potencial de iluminación natural. Son los ocupantes los que abren o cierran estos elementos en base a su percepción de las condiciones ambientales interiores, generalmente para acabar con situaciones de desconfort térmico y visual. Sin embargo, suele ser bastante habitual que una vez reducida la entrada de luz al espacio, estos dispositivos sigan cerrados aunque las condiciones exteriores hayan cambiado [1] [5].

Por tanto, es deber de la Arquitectura acondicionar sus espacios para proporcionar unos niveles mínimos de confort visual y térmico, minimizando la acción del usuario, que generalmente tiene lugar para mitigar el exceso de radiación solar en el espacio. En este sentido, los arquitectos tienen un papel clave a la hora de diseñar edificios que integran los aspectos térmicos y lumínicos, entre otros, para proporcionar espacios con unas condiciones ambientales confortables para los usuarios.

Sin embargo, el panorama relativo al cálculo de la iluminación natural ha cambiado en los últimos diez años. Vistas las limitaciones de los métodos e indicadores anteriores, se han desarrollado métodos de cálculo e indicadores que permiten calcular y analizar los valores horarios o sub-horarios de iluminación natural global, directa y difusa, para cada punto del espacio en base a las condiciones meteorológicas recogidas en archivos climáticos normalizados. Se ha pasado de las simulaciones estáticas a las *Simulaciones Dinámicas de Iluminación Natural (Dynamic Daylight Simulation -DDS)*, permitiendo considerar la variabilidad de la misma [6].

Estamos pues en condiciones de evaluar cuantitativamente la acción de la radiación solar, en su faceta lumínica y térmica, que entra a través de los huecos de los edificios en función de las condiciones climáticas locales y con una resolución horaria o sub-horaria, de forma que se pueda realizar un análisis integrador de los elementos que determinan las condiciones de iluminación natural de un edificio.

Para recuperar y mantener la relación que, hasta el desarrollo de las fuentes de iluminación artificial, ha mantenido siempre la Arquitectura con la Luz Natural y con las condiciones ambientales de su entorno, es necesario conocer cuantitativamente cómo afectan las estrategias arquitectónicas a las condiciones interiores. Estas estrategias arquitectónicas pueden venir de la incorporación de experiencias previas provenientes del legado cultural de la Historia de la Arquitectura o bien del desarrollo de nuevas expresiones culturales propias de su tiempo [7]. El análisis integrador de las estrategias arquitectónicas permitirá la toma de decisiones de proyecto más conscientes y coherentes permitiendo el diseño de la Iluminación Natural a través de la Arquitectura.





## 1.2 Antecedentes

Mi trayectoria en el ámbito de la Investigación, el Desarrollo y la Innovación (I+D+i) y la presente tesis se enmarcan dentro de la línea de investigación sobre Acondicionamiento Ambiental que viene desarrollando, desde hace más de dos décadas, el grupo de investigación *Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía (Architecture, Heritage and Sustainability -ARHESUS)*, grupo TEP 130 del *Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (PAIDI)*, adscrito al *Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC)* de la *Universidad de Sevilla*, radicado en la *Escuela Técnica Superior de Arquitectura*, agrupando a profesores e investigadores de los *Departamentos de Construcciones Arquitectónicas I, Física Aplicada II y Física Aplicada III*.

El grupo *ARHESUS* cuenta con una dilatada experiencia en el desarrollo de tesis doctorales, trabajos y proyectos de investigación promovidos por distintos órganos de la Administración Pública en el ámbito del Acondicionamiento Ambiental, siendo de especial relevancia para el desarrollo de esta tesis doctoral, los desarrollados en los campos de Iluminación Natural y Eficiencia energética en la Edificación.

Cada una de las etapas vividas desde 2004, cuando comencé esta andadura, han marcado la concepción, elaboración y evolución de esta tesis doctoral.

1. Alumna interna del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, en mi etapa final de estudiante de arquitectura, durante los cursos 2004/05, 2005/06, 2006/07 y 2007/08.

Bajo la dirección del profesor Jaime Navarro Casas, director del grupo *ARHESUS*, redescubrí la Iluminación Natural en la Arquitectura, tema del que sólo vi una pincelada en una asignatura. Profundicé en los conceptos, fundamentos y métodos de cálculo, el manejo de programas de cálculo específicos, así como la elaboración e interpretación de las cartas solares. Todo ello se vio complementado con el estudio de los fundamentos y método de cálculo de las Instalaciones de Energía Solar Térmica, incipiente asignatura de libre configuración.

2. Título oficial de Máster Universitario en Arquitectura y Patrimonio Histórico en el curso 2008/09, opción investigación.

En el Trabajo Fin de Máster de investigación, dirigido por el profesor Jaime Navarro Casas, titulado *'Análisis comparativo de Iluminación Natural bajo simulación informática: Luz Cenital'* se analizaban diferentes estrategias arquitectónicas relativas a la iluminación cenital de los espacios mediante la simulación de modelos para la obtención y comparación de resultados cuantitativos y cualitativos en base a los valores de *Factor de Iluminación Natural (DF)* y a la distribución de iso-líneas respectivamente.

3. Becaria de proyectos de investigación, a partir de 2007, entre los que destacan por su relación con la presente tesis doctoral:

- 3.1. 2007-2009. Proyecto I+D+i Eficacia: Reducción del consumo energético y del impacto ambiental en la construcción de viviendas protegidas en Andalucía.

Eficacia es un proyecto de I+D+i financiado principalmente por la *Corporación Tecnológica de Andalucía (Junta de Andalucía)* y la *Empresa Municipal de la Vivienda de Sevilla (EMVISESA)* que, mediante la monitorización de un edificio de viviendas real y la utilización de herramientas informáticas de simulación

energética, estudia la optimización de la demanda energética en los edificios de vivienda colectiva.

Mi participación en el proyecto se centró fundamentalmente en el desarrollo y ejecución de los modelos informáticos de simulación energética, que incluían el estado real de las 8 viviendas monitorizadas, así como el estudio y análisis de diferentes propuestas de soluciones constructivas, incluyendo propuestas de protección solar, para evaluar su incidencia sobre la demanda energética.

Durante el desarrollo del proyecto, aprendí la sistemática de la realización de un proyecto científico de investigación, basado en el método científico, así como adquirí destreza en el manejo de diferentes programas de simulación energética y profundicé en los fundamentos físicos de la demanda energética de los edificios.

3.2. 2011-2012. Proyecto Tecnocai- Acciona: Tecnologías eficientes e inteligentes orientadas a la salud y al confort en ambientes interiores.

Este proyecto, financiado por *Acciona Instalaciones*, se enmarca en la investigación sobre los efectos de la iluminación tanto natural como artificial en el bienestar, el rendimiento y la productividad de los usuarios en lugares de trabajo y estudio, su influencia a nivel fisiológico como psicológico del usuario, en los ritmos biológicos y en la salud. Se analizaron las condiciones de iluminación natural en edificios de oficinas bajo diferentes hipótesis tipológicas para optimizar las condiciones de confort lumínico en función de la actividad que se realice en el espacio interior y se estudiaron diferentes estrategias de acondicionamiento lumínico y de instalaciones de iluminación artificial.

En el marco de este proyecto de investigación pude, por primera vez, desarrollar y analizar modelos de *Simulación Dinámica de Iluminación Natural (DDS)* para la obtención de *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (Dynamic Daylight Metrics -DDMs)*, y su comparación con los resultados de *DF*.

Además de la actividad investigadora, que tiene una relación directa con la concepción, motivación y configuración de esta tesis doctoral, he desarrollado, desde 2010, una trayectoria docente que abarca tanto el ámbito universitario con cursos de formación de Grado, Experto Universitario o Máster Universitario como ámbitos no universitarios, relacionados principalmente con la Eficiencia Energética en la Edificación, proporcionando una mayor profundización de conocimientos, así como de reflexiones acerca de la vinculación entre la Eficiencia Energética y la Iluminación Natural.

Así también he desarrollado, desde 2010, una trayectoria profesional ligada a la eficiencia energética de la edificación y a la iluminación natural, saliendo, por tanto, del ámbito teórico y académico, aportando una visión diferente y complementaria de la realidad de la iluminación natural en la Arquitectura.

Esta tesis, por tanto, continúa los trabajos que iniciara con el desarrollo del Trabajo Fin de Máster incorporando el nuevo método de cálculo de la Iluminación Natural y el aspecto térmico de la misma, analizando la naturaleza de los indicadores para poder desarrollar otros nuevos que sean de utilidad a la práctica profesional y que permitan avanzar en la transición entre el antiguo indicador estático, *DF*, y los nuevos indicadores dinámicos.

### 1.3 Planteamiento del problema

El diseño de las condiciones de iluminación natural sigue siendo hoy en día una tarea complicada debido a la gran cantidad de variables que intervienen en las mismas, que, además, dependen de las decisiones tomadas durante la elaboración del proyecto arquitectónico, sobre el que también intervienen otros muchos factores para llegar a la definición formal y material definitiva.

Del mismo modo en que se ha demostrado que la iluminación natural es beneficiosa para la salud humana, su bienestar y su estado de ánimo [8], que permite reducir el consumo energético de iluminación artificial [9] [10], entre otros muchos aspectos; un inadecuado diseño de las condiciones de iluminación natural de los espacios interiores puede provocar diversos problemas de confort, térmico y lumínico [11] [12].

Aunque nos encontramos en un contexto en plena transformación, promovido por el desarrollo de nuevas técnicas de computación y de programas de simulación integradores, actualmente, en la práctica profesional, cada aspecto de la radiación solar que incide sobre un espacio se estudia por vías diferenciadas. Mientras que el estudio gráfico y cuantitativo de las ganancias solares a través de los huecos apenas ha sufrido cambios, el estudio cuantitativo de las condiciones de iluminación natural ha experimentado una gran evolución en las últimas dos décadas.

La emergencia de los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)* [13], en los últimos años, permite obtener con mayor precisión de las condiciones de iluminación natural en un espacio en base a las condiciones climáticas locales, pero aún se encuentran en proceso de integración en la práctica profesional, desplazando progresivamente al *Factor de Iluminación Natural (DF)*, que ha sido prácticamente el único indicador objetivo de iluminación natural desde mediados del siglo XX.

El indicador *DF* representa la relación entre la iluminación difusa interior y exterior, se calcula para una condición de cielo estática y no puede reflejar la variabilidad de la luz natural. Su uso está generalizado y asumido debido a su simplicidad de cálculo [14].

Sin embargo, en los climas cálidos donde apenas se producen días nublados, el cálculo del *DF* no resulta de gran utilidad en el análisis de las condiciones de iluminación, salvo para aportar información de condiciones mínimas, cuando se calcula utilizando el modelo de *Cielo Nublado Estándar CIE (CIE Standard Overcast Sky)*. Es por esto que, progresivamente, el análisis de las condiciones de iluminación natural se ha desplazado a un segundo lugar, o incluso ignorado, especialmente en estas regiones.

Debido a la complejidad que conlleva un adecuado diseño de las condiciones de iluminación natural, se han desarrollado numerosas herramientas para ayudar a los arquitectos en esta tarea. Entre estas herramientas se encuentran las reglas de oro, el uso de modelos a escala, guías de diseño, estudio de casos concretos, etc.; que suelen utilizarse en la elaboración de los primeros bocetos y esquemas del edificio [15].

Poco a poco, estas herramientas están siendo reemplazadas por el uso de programas de simulación, tanto en el ámbito profesional como en la formación arquitectónica, y progresivamente estos programas permiten obtener datos cada vez más precisos, así como obtener resultados de diferentes aspectos ambientales con el mismo modelo virtual.

Las herramientas de simulación hoy en día son especialmente importantes para analizar el comportamiento de un edificio, permitiendo considerar la variabilidad y particularidad de las condiciones climáticas locales, expresado a través de indicadores que muestran la evolución anual del comportamiento del edificio. Sin embargo, el uso de estas herramientas suele llevarse a cabo

una vez que el edificio está definido o para probar algunas últimas variaciones, raramente suelen utilizarse como herramientas de diseño, particularmente porque la creación de los modelos requiere de una gran cantidad de datos y detalles que todavía no están definidos en las primeras fases del proyecto arquitectónico [15] [16].

El uso de los programas de simulación además necesita de un cierto tiempo de aprendizaje para manejar adecuadamente el programa, crear correctamente el modelo virtual, obtener los resultados deseados y, lo más importante, para saber analizarlos, interpretarlos y saber qué decisiones tomar para mejorar dichos resultados.

La cuestión es porqué a pesar de la existencia de la *Modelación climática de la Luz Natural (Climate Based Daylight Modelling -CBDM)* [13] que proporciona datos de iluminación para cada punto de cálculo en base horaria o sub-horaria a partir de los datos recogidos en los archivos climáticos (del mismo modo que los datos utilizados para el análisis térmico) ésta no se utiliza generalmente a la hora de tomar decisiones en el proyecto arquitectónico. Tal como *C.F. Reinhart y J. Wienold* han detectado [17], existen varias barreras para la incorporación de los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)* en la práctica habitual de la arquitectura, algunas de ellas son:

1. No se sabe de la existencia de estos indicadores dinámicos, tan sólo de la existencia del *DF*. Y aún así, muchas veces no existe ningún tipo de requerimiento mínimo normativo para el *DF* o no está actualizado. La ausencia de marco regulador de obligado cumplimiento para realizar estudios de iluminación natural y para actualizar los conocimientos hacia los *DDMs* deja esta consideración del acondicionamiento ambiental en un segundo plano, o bien en el olvido.
2. Se necesita otro modelo virtual. Actualmente, se requieren diferentes modelos virtuales para calcular diferentes aspectos del edificio; añadir otro programa al proceso arquitectónico cuando no existe ningún requerimiento normativo lo convierte en un problema más que una herramienta para mejorar el diseño arquitectónico. Además, estos nuevos programas desarrollados para calcular los *DDMs* normalmente no cuentan con una interfaz cómoda, y su proceso de aprendizaje muchas veces es muy difícil.
3. No se sabe cómo interpretar los resultados. Una de las razones por las que el *DF* se ha desplazado a un segundo lugar es que, con frecuencia, no se entienden los resultados o su significado. Parece que en algunos países faltan criterios para analizar los indicadores de iluminación natural, no importa si es *DF* o cualquier *DDMs*; o bien no se sabe cómo obtener algunos parámetros, como la *iluminancia difusa horizontal exterior*, clave para la interpretación de los resultados.

El primer punto se puede resolver mediante la actualización de la formación en iluminación natural en las universidades y colegios profesionales, y con la implementación de una nueva normativa que considere como indicadores de iluminación natural los *DDMs*. Esta nueva normativa daría algunos criterios para interpretar los resultados, por lo que el tercer punto también podría resolverse tras el estudio y la determinación de dichos criterios.

El segundo punto es más complejo de resolver, ya que incluso cuando ya existen diversos programas con tecnología *BIM (Building Information Modelling)*, para no perder precisión en los resultados, lo habitual es que faciliten la exportación a los motores de cálculo específicos según el tipo de análisis requerido, siendo necesario, por tanto, la instalación de dichos motores de cálculo, así como el conocimiento de lenguaje de programación en muchos casos.

Respecto al tercer punto, en algunos países existen requerimientos mínimos de *DF*, pero no sucede así en todo el mundo. Asimismo también existen requerimientos mínimos de *DF* para la obtención de ciertos certificados ambientales, como el certificado *LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)* [18] o *BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)* [19], siendo universales independientemente de la localización o de la tarea visual que se desarrolle en el interior de los espacios.

Actualmente diversas organizaciones, como el *Comité Internacional de la Iluminación (CIE - Commission Internationale d'Eclairage)* o la *Sociedad Americana de Ingenieros de Iluminación (IESNA- Illuminating Engineering Society of North America)*, están trabajando para la concreción de criterios para los indicadores dinámicos, pero es un debate que todavía está abierto y, por tanto, inconcluso. Además, dichos criterios están enfocados exclusivamente a las condiciones de iluminación de cierto tipo de espacios o actividades, olvidando la cuestión térmica, de gran relevancia en las regiones cálidas.

En este contexto se puede decir que faltan herramientas que proporcionen información sobre el efecto de las decisiones de proyecto sobre las condiciones de iluminación natural en base climática que puedan ser aplicadas en las primeras fases del proyecto arquitectónico [16]. Además, debido a la vinculación entre la entrada de luz solar y las ganancias solares de un espacio, y la presión actual por minimizar y optimizar el comportamiento energético de los edificios, también se echa en falta la integración entre la provisión de unas adecuadas condiciones de iluminación y su efecto en las ganancias térmicas de los espacios.

Especialmente en los climas más cálidos, es crucial obtener un equilibrio entre la admisión de luz natural y la admisión de calor por ganancia solar para proporcionar un mejor confort ambiental y reducir el consumo energético global de los edificios.

Como arquitecta, al abordar cualquier proyecto arquitectónico sobre el que pretendo que las condiciones de iluminación natural cumplan con unos determinados requisitos, no puedo evitar preguntarme: ¿Cómo afectan cada una de mis decisiones formales a la entrada y distribución de la luz natural en el espacio? ¿Cómo puedo controlar y diseñar las condiciones de iluminación natural? Considerando además que la entrada de radiación solar en un espacio supone una fuente de calor, a veces insoportable, ¿cómo puedo llegar al equilibrio entre la entrada de luz natural y la entrada de calor asociada a la misma?

Como consecuencia de estas preguntas se formula la siguiente hipótesis:

*Conociendo el peso relativo de los diferentes parámetros que afectan a la entrada y distribución de la radiación solar global en un espacio es posible predeterminar las condiciones de iluminación natural y de insolación de una realidad compleja mediante la aplicación de los factores de proporcionalidad de cada uno de los parámetros a un modelo de geometría sencilla de referencia.*



## 1.4 Objetivos generales y específicos

Ante la distancia actual entre el proyecto de Arquitectura y el proyecto de iluminación natural así como la diferencia evidente y falta de integración entre el cálculo de las condiciones de insolación y de las condiciones de iluminación natural, esta tesis propone como objetivo principal:

*Fomentar el Diseño de Iluminación Natural en Arquitectura a través del conocimiento del impacto de las estrategias arquitectónicas sobre las condiciones ambientales interiores a través de establecimiento de indicadores en base climática que describan e integren el aspecto lumínico y térmico de la radiación solar directa e indirecta que entra a través de los huecos.*

Debido a la amplitud de dicho objetivo principal y a que se plantea la integración de cuestiones que normalmente se estudian separadamente, se plantean varios objetivos específicos para su consecución:

1. Analizar la naturaleza de los diferentes indicadores de iluminación natural y de insolación para detectar las similitudes y diferencias de sus bases de cálculo.
2. Establecer un marco común de cálculo que permita la comparación de los resultados descriptivos de la iluminación natural y la insolación de un espacio en los mismos términos.
3. Establecer criterios para analizar los valores resultantes de los nuevos indicadores surgidos del marco común de cálculo en base a las recomendaciones y especificaciones derivadas del Estado del Arte.
4. Desarrollar una metodología de cálculo y tratamiento de datos para la obtención de los resultados descriptivos y analíticos de la iluminación natural y la insolación de un espacio.
5. Estudiar y analizar diferentes estrategias arquitectónicas relacionadas con la iluminación natural en base a los nuevos indicadores y sus criterios de evaluación.
6. Determinar el impacto de cada estrategia sobre la Iluminación Natural y la Insolación de un espacio de referencia.
7. Aplicar el factor de impacto o proporcionalidad de cada estrategia o parámetro sobre el modelo de referencia para predeterminar las condiciones de iluminación natural y de insolación de una realidad compleja que permita establecer el margen de variación y aplicación de las diferentes estrategias de forma que se asegure una adecuada iluminación natural del espacio en equilibrio con las ganancias solares recibidas.

La información obtenida permitirá determinar cuáles son los parámetros de diseño de mayor relevancia y que necesitan de una mayor atención en el proyecto arquitectónico. Además, proporcionará información que permita considerar en las primeras fases de proyecto la iluminación natural y la insolación recibida, como el efecto del emplazamiento o el comportamiento que tendrán los espacios según la orientación. Asimismo, una vez definido el proyecto arquitectónico, facilitará la toma de decisiones encaminadas a mejorar las condiciones de iluminación natural en equilibrio con la demanda energética.

El estudio realizado para cada variación de cada estrategia arquitectónica reflejará la incidencia de la misma en la iluminación natural y la insolación de un espacio de referencia y formará la base documental para la creación de una herramienta capaz de ayudar a fomentar el diseño de la iluminación natural en equilibrio con la insolación a través de la utilización consciente de las diferentes estrategias arquitectónicas de iluminación natural.





## 1.5 Metodología

Esta investigación tiene como objetivo fundamental conocer cómo afectan, cualitativa y cuantitativamente, determinadas decisiones de proyecto sobre las condiciones de iluminación natural y las ganancias solares térmicas en base a las condiciones climáticas locales (base climática).

Con este conocimiento se pretende fomentar un diseño arquitectónico pasivo donde ambos aspectos, el lumínico y el térmico, de la radiación solar que entra en un espacio a través de las ventanas se contemplen simultáneamente, aportando una visión integradora.

Para alcanzar dicho objetivo este trabajo se ha planteado siguiendo los pasos del método científico. De esta forma, tras definir la problemática y el objetivo de la investigación [Capítulo 1.- Introducción] y haber realizado una revisión de la literatura y de los últimos avances en el conocimiento de los diferentes aspectos implicados en base a investigaciones previas [Capítulo 2.- Estado del Arte], se diseña un experimento [Capítulo 3.- Metodología], utilizando equipos y métodos reconocidos científicamente, que permita la recopilación de la información necesaria que describa el efecto lumínico y térmico de la radiación solar que entra en un espacio a través de sus ventanas.

Los métodos estadísticos se utilizan para la clasificación y organización de la información obtenida en el experimento, para la elaboración de indicadores descriptores de las condiciones de iluminación natural y de insolación del espacio a escala temporal mensual y anual y para realizar el análisis de cada variable independiente del experimento [Capítulo 4.- Análisis de resultados]. De dicho análisis se obtienen las conclusiones del trabajo de investigación [Capítulo 5.- Conclusiones] de forma que se puedan extraer indicaciones útiles o recomendaciones de diseño encaminadas a proporcionar confort visual considerando su implicación térmica, por lo que también será de utilidad para la eficiencia energética del edificio.

La comunicación de los resultados a la comunidad científica es fundamental para que el trabajo de investigación pueda ser validado y contrastado. Ésta no sólo consiste en la publicación del presente documento donde se recogen los trabajos realizados en la elaboración de la tesis doctoral, sino también la publicación de diversos aspectos relacionados con el tema principal de esta investigación.

En este sentido, se ha dado difusión a diferentes aspectos de este trabajo de investigación en diversos foros, mediante la participación en la publicación de artículos en revistas científicas, como *Lighting Research and Technology*, o la participación en congresos. También se ha dado a conocer el contenido y enfoque de este trabajo mediante una estancia de investigación en el *Instituto de Energía y Desarrollo Sostenible (Institute of Energy and Sustainable Development -IESD)* de la Universidad DeMonfort (Leicester, UK) para profundizar en algunos aspectos relacionados con los indicadores dinámicos de iluminación natural con el Profesor J. Mardaljevic o a la asistencia a foros académicos internacionales específicos para estudiantes de doctorado en Iluminación, como *Lumenet 2012* celebrado en la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Sheffield (Sheffield, UK) o el *2º Foro Académico de Iluminación Natural de Velux*, celebrado en la Escuela de Arquitectura de Copenhague (Copenhague, Dinamarca), recibiendo críticas constructivas de diferentes expertos reconocidos internacionalmente de iluminación natural.

Artículos relacionados:

1. *Chi Pool, Doris A.; Moreno Rangel, David; Esquivias Fernández, Paula M.; Navarro Casas, Jaime;* "Optimization method for perforated solar screen design to improve daylighting using orthogonal arrays and

- climate-based daylight modelling”, *Journal of Building Performance Simulation*, published online, June 2016. 10.1080/19401493.2016.1197969
2. *Esquivias Fernández, Paula M.; Muñoz González, Carmen M.; Acosta García, Ignacio J.; Moreno Rangel, David; Navarro Casas, Jaime*; “Climate-based daylight analysis of fixed shading devices in an open-plan office”, *Lighting Research And Technology*, no. 48, 205-220, 2016. 10.1177/1477153514563638
  3. *Acosta García, Ignacio J.; Muñoz González, Carmen M.; Esquivias Fernández, Paula M.; Moreno Rangel, David; Navarro Casas, Jaime*; “Analysis of the accuracy of the sky component calculation in daylighting simulation programs”, *Solar Energy*, no. 119, pp. 54-67, 2015. 10.1016/j.solener.2015.06.022
  4. *Muñoz González, Carmen M.; Esquivias Fernández, Paula M.; Moreno Rangel, David; Acosta García, Ignacio J.; Navarro Casas, Jaime*; “Climate-based daylighting analysis for the effects of location, orientation and obstruction”, *Lighting Research and Technology*, no. 46, pp 268-280, 2014. 10.1177/1477153513487005
  5. *Acosta García, Ignacio J.; Navarro Casas, Jaime; Sendra Salas, Juan J.; Esquivias Fernández, Paula M.*; “Daylighting design with lightscoop skylights: Towards an optimization of proportion and spacing under overcast sky conditions”, *Energy And Buildings*, no. 49, pp. 394-401, 2012. 10.1016/j.enbuild.2012.02.038
  6. *Domínguez Amarillo, Samuel; Sendra Salas, Juan J.; Leon Rodriguez, Angel L.; Esquivias Fernández, Paula M.*; “Towards Energy Demand Reduction in Social Housing Buildings: Envelope System Optimization Strategies”, *Energies (Basel)*, no. 5, pp. 2263-2287, 2012. 10.3390/en5072263

#### Participación en Congresos y otros foros académicos

1. *Fernández Expósito, M.; Esquivias Fernández, Paula M.; Moreno Rangel, David*; “Luminous and thermal impact of fixed solar shading devices”, in *III Congress on Construction and Building Research (COINVEDI)*. Escuela Técnica Superior de Edificación. Universidad Politécnica de Madrid. 2015
2. *Esquivias Fernández, Paula M.*; “Architecture, Heritage and Sustainability”, in *II Workshop on Sustainable Architecture*. Departamento Construcciones Arquitectónicas I. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla. 2015
3. *Esquivias Fernández, Paula M.; Moreno Rangel, David; Fernández Expósito, M.*, “Dynamic Daylight Simulation: New technics and metrics to study strategies to reduce Lighting energy Consumption”, in *II International and IV National Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Sevilla. 2015
4. *Esquivias Fernández, Paula M.; Moreno Rangel, David; Fernández Expósito, M.*; “Ahorro energético y Confort lumínico: La protección solar en el paradigma de la Arquitectura actual”, in *Greencities & Sostenibilidad. Inteligencia aplicada a la Sostenibilidad Urbana*. Universidad de Málaga y Palacio de Ferias y Congresos de Málaga. 2014
5. *Esquivias Fernández, Paula M.; Navarro Casas, Jaime; Moreno Rangel, David*; “Towards the Control of Daylighting in Buildings: Climate-based thermal and daylight characterization”, in *5th VELUX Daylight Symposium 2013. New Eyes on Existing Building*. The Royal Danish Academy of Fine Arts, The Royal Danish Academy of Fine Arts, School of Architecture, Copenhagen. 2013
6. *Moreno Rangel, David; Muñoz González, Carmen M.; Esquivias Fernández, Paula M.; Acosta García, Ignacio J.; Navarro Casas, Jaime*; “Energy and cost savings by using lighting controls in offices”, in *CIBSE & SLL International Lighting Conference Dublin 2013*. Dublin (Ireland). 2013
7. *Esquivias Fernández, Paula M.*; “Luminous Characterization of Vertical Openings”, in *Lumenet 2012, A workshop for PhD research students of the art and science of lighting*. School of Architecture, University of Sheffield. 2012
8. *Esquivias Fernández, Paula M.; Navarro Casas, Jaime; Muñoz González, Carmen M.*; “Hacia la optimización del aprovechamiento de la luz natural a través del diseño de huecos”, in *Greencities. 2º*

*Salon de la Eficiencia Energetica en Edificacion y Espacios Urbanos*. Universidad de Málaga y Palacio de Ferias y Congresos de Málaga. 2011

9. *Esquivias Fernández, Paula M.*; “Maximizing the use of Daylight”, in *International Workshop for Orange & Green and University of Seville Knowledge Exchange*. Departamento Construcciones Arquitectónicas I. Escuela Técnica Superior de Arquitectura Se Sevilla. 2011
10. *Acosta García, Ignacio J.; Navarro Casas, Jaime; Esquivias Fernández, Paula M.*; “Daylighting as a Form Generator for Skylights”, in *4th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management*. Merida, Badajoz. 2011



## 1.6 Estructura del documento

Conforme al planteamiento metodológico este documento se estructura a través de diferentes capítulos que reflejan cada una de las partes contenidas en las etapas de investigación:

### 1. Introducción

El objetivo del capítulo 1 es dar una visión general, un marco de referencia, sobre el tema de la investigación, un contexto para la expresión del propósito del estudio y el desarrollo del documento o informe de la investigación realizada.

En primer lugar, se presentan la justificación y los antecedentes que han propiciado el inicio de la investigación, en parte debidos a las inquietudes despertadas durante la elaboración del proyecto de investigación realizado para obtener el grado académico de máster, apoyados sobre la observación de la relación entre la práctica arquitectónica y la consideración de la luz natural.

Como resultado de la revisión de la bibliografía al respecto, de la profundización en el conocimiento de la materia, de la visión global de los acontecimientos que han llevado a la situación actual y de la observación de la complejidad de las interrelaciones que presenta la incorporación del diseño de las condiciones de iluminación natural en la práctica arquitectónica, se ha perfilado el ámbito de investigación y se ha planteado el problema científico.

Derivado del planteamiento del problema, se enuncia el objetivo general de esta tesis doctoral establecido como una propuesta que ayude a solventar la cuestión. Así también se definen los objetivos específicos de la investigación que corresponden con las acciones que van a permitir el alcance del objetivo general.

Así también se enmarca esta investigación dentro del método científico y la metodología experimental como el medio para conseguir los objetivos fijados y se introduce una breve descripción de la misma.

### 2. Estado del Arte

En el capítulo 2 se muestra el panorama del conocimiento sobre la materia que se trata en esta tesis, es decir, la iluminación natural en la arquitectura, así como algunas cuestiones sobre su incidencia térmica.

Sobre la base de la información obtenida durante estos trabajos previos a la investigación, se muestra el estado del conocimiento relativo a la investigación organizado en apartados para exponer las diferentes áreas correspondientes a los diversos aspectos que se quieren abordar en este trabajo de investigación.

En el primer apartado se hace un recorrido histórico entrelazando la historia de la arquitectura con el desarrollo tecnológico, el pensamiento de la época, los hechos históricos más relevantes, los textos escritos por los arquitectos sobre el control de la iluminación natural en sus edificios y el desarrollo de la disciplina de la iluminación natural.

En el segundo apartado se exponen los fundamentos de la disciplina de la iluminación natural y el estudio del asoleo y la insolación que son relevantes en el desarrollo de esta tesis.

A continuación se estudian las recomendaciones y criterios definidos por instituciones y organismos para obtener una adecuada iluminación natural así como condiciones de soleamiento.

En el cuarto apartado se recogen estudios y publicaciones científicas relacionadas con los diferentes elementos arquitectónicos que intervienen en las condiciones de iluminación natural interior, así como en las condiciones de insolación.

Finalmente el capítulo termina con un último apartado donde se exponen las conclusiones extraídas del estudio de la documentación que ha dado pie a los diferentes subcapítulos.

### 3. Metodología

Este capítulo describe el procedimiento seguido para la realización de la investigación, presentando la información de forma detallada para permitir la reproducción de los experimentos llevados a cabo.

Para llevar a cabo los objetivos propuestos, se plantea el enfoque metodológico de la investigación científica experimental, expresado a través de un conjunto de experimentos calculados mediante programas de simulación específicos en el que cada modelo de cálculo se construye mediante la modificación del valor de un parámetro.

En primer lugar se exponen las características relativas al diseño del experimento comenzando por la definición del modelo de referencia y el establecimiento y definición de las estrategias arquitectónicas relacionadas con la iluminación natural y la insolación que van a ser estudiadas.

La selección de las estrategias y del rango de variación de las mismas viene determinada por la revisión bibliográfica hecha en el capítulo 2, donde se muestran qué elementos son los que intervienen en las condiciones de iluminación natural y cuáles son los más relacionados con el diseño arquitectónico. Cada estrategia constituye un parámetro de cálculo, el rango una serie de cálculo y cada elemento individual dentro de la serie un factor de cálculo.

A continuación se describen los instrumentos y métodos utilizados para la recolección de los datos necesarios para la elaboración de los resultados de forma individualizada. Se describen los datos necesarios para utilizar dichas herramientas, las particularidades de su manejo, sus limitaciones y los datos que proporcionan.

Se define el procedimiento seguido para la obtención de valores de iluminancia, de horas de soleamiento y de las ganancias solares a través de las ventanas, es decir, los valores primarios sobre las condiciones de iluminación natural y la admisión de ganancia solar térmica debido a cada uno de las modificaciones de los parámetros estudiados.

Finalmente se establece un marco común de integración y comparación de los diferentes datos primarios, dando lugar a la creación y definición de nuevos indicadores conjuntos de iluminación natural e insolación. Se definen, además, los límites superior e inferior de los indicadores obtenidos, de forma que delimitan el rango de valores útiles para obtener unas determinadas condiciones operativas o de confort del espacio. Estos criterios de análisis se basan en trabajos de investigación anteriores, reflejados en el capítulo 2.

Como parte complementaria al desarrollo de los criterios de análisis se ha realizado un estudio específico sobre la relación entre el *Factor de Iluminación Natural (FIN, Daylight Factor -DF)* y las condiciones climáticas locales, que se muestra en el Anexo Documental A.

Se describen las técnicas y procedimientos para el tratamiento de datos primarios de forma que se obtengan los valores descriptivos y analíticos de las condiciones de iluminación natural e insolación que dan lugar a los resultados de la investigación: de cada modelo individual, de cada estrategia estudiada y resultados globales. Para cada tipo de valor y nivel de resolución se define el medio de expresión que resulte más adecuado para su posterior análisis y evaluación.

#### 4. Resultados

En este capítulo se presentan de manera detallada, ordenada y lógica los resultados obtenidos por cada estrategia estudiada, expresados fundamentalmente mediante gráficas, texto y tablas, y se procede a su análisis e interpretación.

Se describen, analizan e interpretan los resultados obtenidos para el modelo de referencia como elemento individual, y para cada estrategia estudiada, donde el modelo de referencia representa uno de los valores incluidos en el rango de variación de dicho parámetro o estrategia.

El análisis de los resultados conjuntos de cada estrategia se basa en gran parte en el análisis de los resultados de cada modelo individual dentro de la estrategia. La caracterización de cada modelo, exposición de resultados y análisis individual se recogen en Fichas Síntesis-Análisis, una por cada modelo de simulación, creadas para sintetizar la gran cantidad de resultados obtenidos y realizar el análisis individual de los resultados. Debido al número de modelos de simulación y, por tanto, de fichas creadas, éstas se muestran en el Anexo Documental B.

Del análisis de cada estrategia, en su conjunto y en relación con el modelo de referencia, es posible interpretar cómo dicho parámetro o estrategia afecta a las condiciones interiores y, por tanto valorar dicho impacto.

Una vez realizado el análisis por cada serie de cálculo, se realiza el análisis global de todos los elementos para obtener aquellos modelos, y por tanto parámetros, en los que se obtienen las mejores condiciones de iluminación natural y las mejores condiciones de insolación, permitiendo de este modo establecer una valoración de los parámetros estudiados.

El análisis de los resultados de cada serie da lugar a la elaboración de unas primeras conclusiones parciales en el siguiente apartado, donde se discuten en relación a las publicaciones científicas estudiadas en el capítulo 2.

Por último se aplican los factores de proporcionalidad obtenidos para cada estrategia sobre un caso real para comprobar si se pueden predecir las condiciones de iluminación natural y de insolación de una realidad compleja y se comparan con los obtenidos mediante simulación para constatar su validez.

#### 5. Conclusiones

En este capítulo se evalúa el cumplimiento de los objetivos propuestos, mediante la recapitulación del propósito de la investigación y el grado de alcance de dicho objetivo con los resultados obtenidos.

Así también se muestran los hallazgos más relevantes de la investigación, se derivan conclusiones acerca de la contribución de la investigación y las limitaciones del estudio, lo cual da lugar al enunciado de algunas sugerencias para futuras investigaciones.

#### Anexos Documentales

Además, al informe de la investigación le acompañan otros documentos. Algunos son complementarios a la elaboración del documento de la tesis doctoral, otros, sin embargo son clave para la realización de la investigación. Para mantener la continuidad argumental, estos estudios se presentan en forma de anexo documental. Estos documentos contienen información sobre los resultados obtenidos de forma individual, ya organizada y sintetizada, o el estudio realizado para la determinación de ciertos valores que sirven de base para el enunciado de los criterios de análisis.





# ESTADO DEL ARTE 2

## 2. State of the Art

This chapter examines different aspects of the relationship between Architecture and Daylighting. It starts by looking at the historical and cultural evolution of daylighting in Architecture, as expressed in the different architectural styles that have reflected ways of thinking in different periods up until the present. It also describes how daylight and insolation have been perceived and studied by architects throughout history, from the objective analysis of Vitruvius through to more poetic conceptualizations.

This historic- cultural evolution is intercalated with a description of technological advances in artificial lighting to facilitate a better understanding of the relationship between Architecture and Daylighting over time. The overview is completed with a look at the events associated with the emergence of daylighting and insolation science - the creation of sky models, metrics, calculation methods, software, etc. -charting how this new discipline evolved in parallel with the historical progress of Architecture.

The second section focuses on the essential physical characteristics of global solar radiation, in terms of both light and heat, and on the development of associated theoretical models and metrics. It explores the theoretical bases underlying sky models and the ways they deal with luminance, the Daylight Factor, solar exposure, Climate-Based Daylight Modelling, daylight coefficients and Dynamic Daylight Metrics. It also addresses the physical bases of Solar Gain, the thermal component of insolation or direct solar radiation.

This section ends with a look at the computational calculation methods used in daylight and energy simulations, and methods of comparing and validating data analysis software to delimit their degrees of inaccuracy and help make them solid and reliable.

No metric or value, whether measured or calculated, can provide information that can be used to assess ambient interior environments until the evaluation criteria concerning such spaces have been defined. The third section therefore analyses evaluation and guideline criteria relating to interior daylighting and insolation.

It examines the Golden Rules that have emerged as a result of practical experience, guidelines included in voluntary standards and requirements set out in obligatory standards governed at European level by EU Directives, at national level by Spanish government legislation and at local level by municipal byelaws. Finally, after analysing how daylighting and insolation are dealt with in environmental accreditation systems like LEED and BREEAM,

The last section looks at more recent standards, such as the one approved by IESNA, and future standards based on the establishment of the Daylight Sufficiency criteria.

Architectural decisions and strategies affecting daylighting and insolation usually have to do with the availability of natural light, as determined by site climate conditions, conditions in the surrounding area and the orientation of the building's facades; the size, shape, transparency, position and distribution of openings, and their resulting capacity to receive and distribute daylight; and the incorporation of shading devices.

## 2. Estado del Arte

En el presente capítulo se aborda la relación entre la Arquitectura y la Luz Natural a través de diferentes aspectos. En primer lugar se estudia la evolución histórica y cultural de la Iluminación Natural en la Arquitectura, expresada a través de los diferentes estilos arquitectónicos, que reflejan el pensamiento de cada época, hasta la actualidad. También se recogen la percepción y estudio de la Iluminación Natural e insolación de los arquitectos a través de la historia, desde el estudio objetivo de *Vitruvio* hasta las concepciones más poéticas.

Este desarrollo histórico cultural se cruza con el desarrollo tecnológico de la iluminación artificial de forma que permita una mayor comprensión de la relación entre la Arquitectura y la Luz Natural en el tiempo. Esta visión se completa con la incorporación de los eventos ligados al desarrollo de la disciplina de la iluminación natural y la insolación: la creación de los modelos de cielo, de los indicadores, métodos de cálculo, programas informáticos...etc. De forma que se obtenga también la visión de la evolución de la disciplina de forma paralela a la evolución histórica de la Arquitectura.

En el segundo apartado se abordan los fundamentos físicos de la radiación solar global, en sus vertientes visible y térmica, así como el desarrollo de los modelos teóricos e indicadores derivados de los mismos. En este sentido se profundiza en los fundamentos de los Modelos de cielo y su distribución de luminancias, del Factor de Iluminación Natural, de la Exposición solar y de la Modelización Climática de la Luz Natural: de los Coeficientes de Luz Natural y de la naturaleza de los Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural. También se abordan los fundamentos físicos de las Ganancias Solares, que vienen siendo la parte térmica de la Insolación o Radiación Solar Directa.

Para completar este apartado se aborda el estudio de los métodos de cálculo computacional que se emplean en la simulación de Iluminación Natural y de la simulación energética, así como los métodos de comparación y validación de los programas informáticos de cálculo que permiten acotar el grado de imprecisión de los mismos, así como les dan solidez y fiabilidad.

Como cualquier valor, medido o calculado, o indicador no son capaces de proporcionar una información que permitan emitir un juicio de las condiciones ambientales de los espacios interiores hasta que no se definen los criterios de evaluación de los mismos. Por ello el tercer apartado aborda el análisis de los Criterios de Evaluación y Recomendaciones relativas a la provisión de Luz Natural de los espacios y a la Insolación de los espacios interiores.

En este recorrido se analizan las Reglas de Oro provenientes del conocimiento práctico basado en la experiencia, las Recomendaciones recogidas en los estándares de aplicación voluntaria, las indicaciones recogidas en las Normativas de Obligado Cumplimiento, tanto a nivel Europeo a través de sus Directivas, a nivel Nacional y a nivel Local a través de las Ordenanzas Municipales. También se aborda el análisis de las condiciones relativas a la Iluminación Natural y la Insolación en los sistemas de Certificación Medioambiental, como LEED o BREEAM.

Finalmente se abordan la normativa más reciente, como la aprobada por la IESNA, y los futuros desarrollo en base al establecimiento del Criterio de Suficiente Luz Natural.

Las decisiones o estrategias arquitectónicas que afectan a las condiciones de iluminación natural y exposición solar, en general, están relacionadas con la disponibilidad de luz natural, determinada por las condiciones climáticas de la localización del edificio, afectadas con las condiciones del entorno y la orientación de las fachadas del edificio; con la capacidad de admisión y distribución de luz natural proporcionada por los huecos, su tamaño, transparencia, forma, posición y distribución; y con la incorporación de elementos de protección solar.

After having studied models, metrics, calculation methods, criteria and guidelines for interior daylighting and insolation, the fourth part of the chapter analyses studies that have been carried out into how different parameters impact those daylight and sunlight conditions, focussing on the architectural recommendations proposed therein.

The lessons learned in each section are then summarized and presented synthetically. In later chapters, they will be compared with the results this research.

Una vez estudiados los modelos, indicadores y métodos de cálculo, así como los criterios y recomendaciones para la provisión de luz natural y el soleamiento de los espacios, el cuarto apartado de este capítulo aborda el análisis de los estudios realizados sobre el impacto de diferentes parámetros en las condiciones de iluminación natural e insolación para extraer las recomendaciones arquitectónicas derivadas de los mismos.

Por último, se resumen las lecciones aprendidas en cada uno de los apartados, expuestas de forma sintética. Estas lecciones se contrastarán en capítulos posteriores con los resultados de este trabajo de investigación.



## 2.1 Iluminación Natural en Occidente

A lo largo de la historia los textos de arquitectura nos hablan de cierta preocupación sobre las características y disposiciones de los edificios. La apertura y distribución de huecos respondía principalmente a la tecnología disponible de la construcción; el modo de incorporar la luz natural en los edificios públicos venía determinada por la visión del mundo correspondiente a cada época: en algunas ocasiones era la expresión del concepto de Dios, en otras, la expresión del poder político o bien, en otras ocasiones respondía a un requerimiento funcional [20].

El significado de la luz y su interpretación se remonta hasta los confines de la historia, siendo ancestralmente el símbolo de la vida por lo que ha sido utilizado en los rituales litúrgicos de la mayoría de las religiones [1].

La relación luz-arquitectura es equiparable a la relación luz-hombre. La arquitectura puede entenderse como el escudo del hombre para protegerse o aprovecharse de las fuerzas de la naturaleza, de la luz (energía, calor) o de la no luz (ausencia de energía, frío) [1]. La arquitectura tiene un papel primordial como protector y regulador de la luz, de la energía. Controlando la luz del Sol, la arquitectura crea espacios más o menos iluminados. La arquitectura depende de la luz.

En la época primitiva y desde el descubrimiento del fuego, el hombre dispone de dos tipos de luz: la luz natural producida por el Sol y la luz artificial producida por el fuego. La primera arquitectura es un espacio con centro en el fuego que consiste en una estructura de troncos y ramas, con una abertura por el centro en la parte superior por donde salen los gases de la combustión de la hoguera.

En el templo egipcio, se pasa escalonadamente de un espacio lleno de luz a una zona en penumbra iluminada por una lámpara de aceite. La gradación exterior-interior, de menor a mayor privatización de la típica vivienda lineal, se refleja en los espacios sucesivos del templo, donde la penetración hacia el santuario se acompaña arquitectónicamente con gradaciones de mayor a menor iluminación [3] [21].

En Grecia, cuna de la cultura occidental, la vida política y social empieza a cobrar importancia. El desarrollo de la filosofía, la geometría, así como el conocimiento en astronomía, especialmente de las trayectorias solares a lo largo del año. Esto permite crear las primitivas cartas solares, propuestas, entre otros, para el diseño urbano [21].

*“una buena casa debe ser fresca en verano y cálida en invierno; las estancias principales deben ubicarse en la planta superior y orientadas al Sur, con buenos voladizos que las protejan durante el verano [...] en las casas orientadas al sur, el Sol penetra por el pórtico en invierno, mientras que en verano el arco solar descrito se eleva sobre nuestras cabezas y por encima del tejado, de manera que hay sombra.”-Sócrates [22].*

*“La Belleza Natural se obtiene [...] si hacemos que las habitaciones y bibliotecas reciban la luz, orientándolas al este; que los baños públicos y los invernaderos reciban la luz desde el occidente; que las pinacotecas y las estancias, que precisan de cierta luminosidad, reciban la luz desde el norte, ya que esta parte ni se oscurece ni adquiere más luminosidad en relación a la posición del Sol, sino que mantiene una misma e inmutable claridad a lo largo de todo el día.”- Vitruvio [23].*

*“Los edificios privados estarán correctamente ubicados si se tiene en cuenta, en primer lugar, la latitud y la orientación donde van a levantarse. [...] hay zonas donde la tierra se ve muy afectada por el curso del sol; otras están muy alejadas y otras, en fin, guardan una posición intermedia y moderada. [...] Parece conveniente que los edificios sean abovedados en los países del norte, cerrados mejor que descubiertos y siempre orientados hacia las partes más cálidas. Por el contrario, en países meridionales, castigados por un Sol abrasador, los edificios deben ser abiertos y orientados hacia el cierzo.”- Vitruvio [23].*

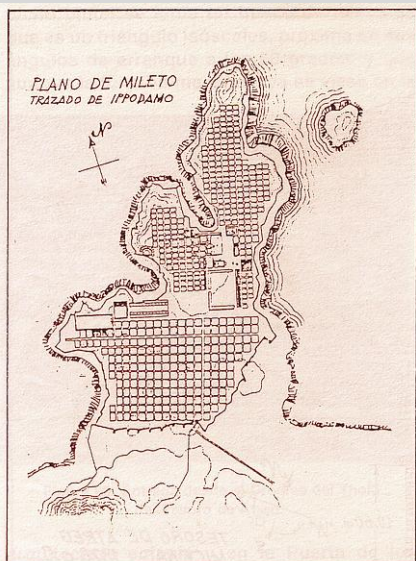


Figura 1: Plano de Mileto [24].

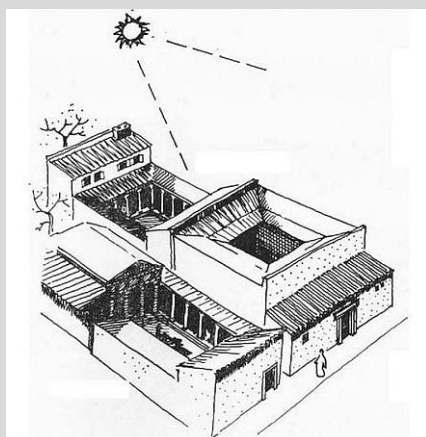


Figura 2: Los patios en las casas griegas y romanas actúan como espacios servidores de iluminación natural y soleamiento [21].



Figura 3: Atrium e Impluvium con columnas. Casa del Menandro (Pompeya, Roma)

*Hipodamo de Mileto*, filósofo y geómetra, es el primer urbanista con criterio científico conocido. Proyectó la reconstrucción de la ciudad de Mileto en el 475 a.C. [Figura 1], mediante un sistema apoyado en calles anchas que se cruzaban perpendicularmente que se denominaría hipodámico [25]. Esta propuesta apuesta por la integración del urbanismo y la política en un espacio racionalmente concebido. Servirá de ejemplo en la construcción de ciudades posteriores.

A partir de entonces, las ciudades se planifican en torno a dos focos importantes: la acrópolis como centro religioso y el ágora como centro cívico donde se daban los intercambios comerciales y económicos de la ciudad. La localización de estos elementos se basaba en el potencial de soleamiento de la ubicación.

Los requerimientos de sanidad pública integradas con las exigencias simbólicas de la mitología marcan, entre otros, la orientación que deben tener las calles y edificios para protegerse del Sol y obtener ventilación. Debido a esto la trama vial y la fachada de los edificios públicos y de las residencias se orientan hacia el Sur, con lo que se conseguía una orientación al Sur de los patios de las casas [3]. En invierno el Sol podía entrar hasta la habitación principal protegida por un pórtico, mientras que en verano, cuando el Sol estaba en lo más alto, el pórtico defendía a la casa de sus rigores.

La tecnología constructiva se basa en muros de carga y cubiertas de madera, limitando la apertura de huecos, especialmente en los templos, realizados en piedra, donde la luz natural era fundamentalmente difusa, potenciada por la incorporación de superficies reflectantes, como el agua y la iluminación artificial se realizaba con lámparas de aceite [3] [20].

En las viviendas, lineal o con patio, la luz se obtenía a través de las ventanas y claraboyas sin cristales, situadas a una altura que protegía la intimidad familiar de la vista de los viandantes. La luz que recibe la casa griega es una luz reflejada. En la casa lineal la luz directa entra por un extremo, a través del hueco de entrada. El grado de iluminación reflejada en su interior da lugar a tres tipos de espacios: el espacio de trabajo, de reposo y de almacenaje [26].

Las casas patio son casas abiertas física y simbólicamente al Sol. Sus habitaciones se abren al patio y regulan la luz y el calor mediante la presencia de cortinas. La luz que incide en el suelo del patio rebota en el techo de la galería y se difunde por todo el espacio [Figura 2] [Figura 3].



En este sentido, *Hipócrates* señala como condición de la polis ideal, la orientación hacia el sur de las fachadas de las casas patio.

Sin embargo, las primeras referencias sobre la incorporación de la iluminación natural en las estancias de forma estandarizada o normalizada se encuentran en el tratado *'De architectura'* (s. I a.C.), de *Marco Lucio Vitruvio* [23] [Figura 4]. Este documento, compuesto por diez libros, adquiere gran importancia ya que servirá de referencia para la difusión de las técnicas constructivas en plena expansión del Imperio Romano (como el uso del arco y de la bóveda).

Sorprende reconocer cómo *Vitruvio* atiende ya a las condiciones de iluminación de la arquitectura doméstica, explicando cómo *"debe ponerse el máximo cuidado en que todos los edificios queden perfectamente iluminados [...]".*

El método que propone *Vitruvio* para asegurar unas condiciones mínimas de iluminación y soleamiento, muestra el conocimiento de la geometría solar y su incidencia en las condiciones de iluminación. En base a este método, los romanos proporcionaron la primera estructura legal para salvaguardar los derechos de luz y al soleamiento en las propiedades existentes frente a los inaceptables desarrollos adyacentes [21]. Sus prácticas anticiparon los complejos requisitos de planificación urbana que se aplican actualmente [4].

La vivienda unifamiliar romana es una mezcla de la casa patio griega y la lineal: atravesando la puerta de entrada se pasa a un espacio público interno, el «atrio», y luego al «peristilo» que es un espacio más privado. El sitio más importante de esta casa es el que se encuentra entre estos dos patios. En Roma se realizan las primeras casas de pisos, estas pierden las ventajas de correcto control ambiental y el control de la luz. En esta época, aparecen las primeras ventanas en Roma y en Egipto [26].

En cuanto a la arquitectura civil y representativa del Imperio, de mayores dimensiones, la iluminación cenital y clerestoria cobra importancia, de forma que se escalonan las cubiertas cerchadas (atrios) o se abren huecos cenitales en cúpulas, como en el *Pantheon* o en la *Domus Aurea* [20] [Figura 6].

En la Edad Media, tras la división del Imperio Romano, Europa se divide en tres grandes áreas: Bizancio en Oriente, Al-Ándalus en la Península Ibérica y el resto de Europa, con la evolución de los feudos y el progresivo crecimiento del poder de la Iglesia Católica.

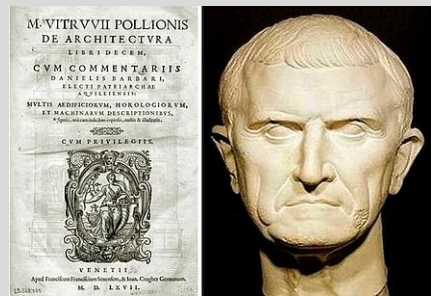


Figura 4: Marco Vitruvio y De Architectura.

*"Para solventar este problema (la presencia de obstáculos que impidan la iluminación de las estancias), procedase de la siguiente manera: desde la parte que considere más apropiada para que penetre la luz, trácese una línea desde lo alto de la pared que obstaculice el paso de la luz, hasta donde lo necesite, y si desde esta teórica línea, mirando hacia arriba puede contemplarse un amplio espacio de cielo, sin ningún problema la luz llegará a este punto. [Figura 5] [...] es muy necesaria la luz en los triclinios y en otras estancias, pero sobre todo en los pasillos, rampas y escaleras ya que con frecuencia se cruzan las personas con otras, cargadas con fardos."-Vitruvio [23].*

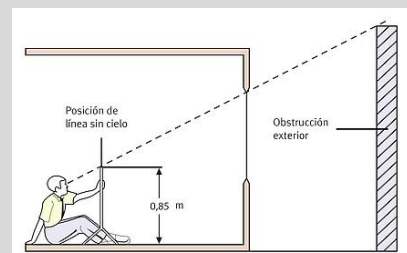


Figura 5: Regla de Oro de Vitruvio [27]. Determinación de la línea sin cielo.



Figura 6: Sala octogonal. Domus Aurea (Roma, Italia), 68 d.C. [28].

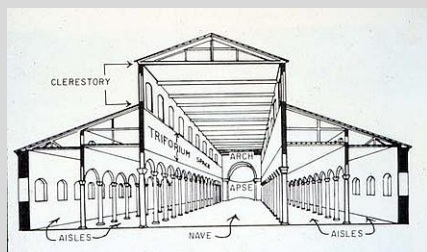


Figura 7: Sección tipo de la basílica paleocristiana.

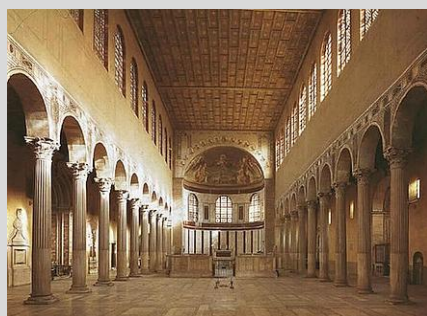


Figura 8: Basílica de Santa Sabina (Roma, Italia), s.V.



Figura 9: Iglesia del Monasterio de San Martín de Tours (Frómista, Palencia, España), s.XI.

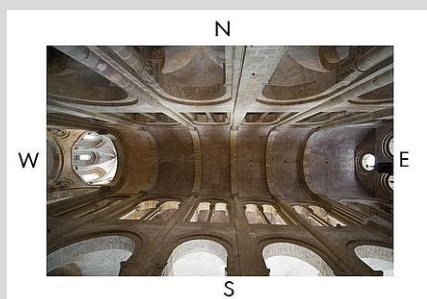


Figura 10: Iglesia abacial de Sainte-Foy de Conques (Conques, Francia), s. XI.

La ruralización y disgregación de Europa lleva a la creación de gremios, prevaleciendo la transmisión oral del conocimiento por lo que apenas se encuentran textos escritos sobre iluminación natural hasta bien entrado el siglo XV.

La conversión al cristianismo del emperador romano *Constantino* y la promulgación del *Edicto de Milán* (313 a.C.), supone la aceptación de la religión cristiana. Los encuentros que hasta este momento se celebraban de forma clandestina, pasan a ser públicos [29]. La luz se convierte en el símbolo de Dios, encarnado en Cristo con las palabras “*Yo soy la luz del mundo*”.

Prolifera, por tanto, la construcción de iglesias que adoptan el modelo de la basílica romana [Figura 7], conservando la iluminación clerestoria de estos espacios y la apertura de tres ventanas en el ábside. La Basílica paleocristiana de *Santa Sabina* [Figura 8], buen ejemplo de ello, apenas ha sufrido cambios desde su concepción [3].

A partir de los siglos IV y V los territorios romanos son invadidos y la estabilidad no comienza a alcanzarse hasta pasado el milenio. El establecimiento de numerosas órdenes monásticas promovió la expansión del cristianismo propiciada la creación de monasterios y abadías.

En general, la construcción masiva (muros de carga de gran porte) del periodo prerrománico y románico dificultó la apertura de huecos. Éstos se hacen más pequeños para evitar las inclemencias del tiempo. Nacen las ciudades fortificadas concentrando en su interior a sus trabajadores, aumentando, de este modo, las necesidades de iluminación natural de la ciudad medieval [21].

En esta época aparecen las primeras ventanas como elemento «regulador de luz». La abundancia de madera hace que ésta sea un material barato y muy utilizado. El desarrollo de las contraventanas de diferentes materiales permitía regular la entrada de luz en las viviendas, que se desarrollaban en las plantas superiores con ventanas pequeñas, dejando la planta baja de los edificios para los establos y las tiendas, protegidas por soportales [21].

La luz representa un papel místico. La iglesia es una nave que va hacia la luz, con un ábside que se orienta hacia el Este y se aleja de la oscuridad, de la puesta del Sol; con la puerta principal al Oeste, para favorecer un tipo de luz y una acción simbólica para llevar a los fieles en una translación de Oeste a Este y transportarlos así en el camino hacia la luz [Figura 9] [Figura 10].

El Oeste representa la región de las tinieblas, y el Este indicando el Sol de levante, esto es el “*signo del triunfo definitivo de Cristo sobre la muerte*” [26]. La arquitectura románica necesita gruesos muros para sostener las bóvedas; los vanos resultan pequeños y las alturas limitadas, determinando espacios de escasa iluminación [Figura 11]. La arquitectura religiosa se construye según los textos sagrados siguiendo, por tanto, la idea de la luz como fuente de vida.

En el siglo IV se publica en el Imperio Romano Oriental el ‘*Corpus Juris Civilis*’ por orden del emperador *Justiniano I*. Entre las disposiciones legislativas civiles se encuentra en el libro VIII, título 2 ‘*Sobre las servidumbres de los estados urbanos*’ incluyendo la distinción legal entre luz natural y vistas [21].

En este momento la iluminación artificial consistía en lámparas de aceite por lo que el acceso a la iluminación natural era un elemento crítico. Para asegurar las condiciones de iluminación, este compendio legislativo recoge cuarenta reglas legales sobre los derechos de los propietarios, relativas a la iluminación natural.

En este periodo se desarrolla la bóveda de arista para dar mayor estabilidad a las construcciones, así como se introduce el rosetón como nueva tipología de hueco [21] [20] [Figura 12].

Durante el gótico se desarrollan el arco apuntado y las bóvedas de crucería, permitiendo concentrar las cargas estructurales en pilares, arbotantes y contrafuertes [3]. Se aligeran los muros alcanzando mayores alturas y con huecos cada vez más grandes [Figura 13] denotando la visión teocentrista del mundo de la Iglesia Católica, vinculando la presencia de Dios con la cualidad de la luz natural [4] [30].

Este hecho está relacionado con la divulgación de las corrientes filosóficas neoplatónicas, que establecen una vinculación entre el concepto de Dios y el ámbito de la luz. La utilización de las vidrieras policromas desplaza la función de la ventana como foco de luz, para convertirse en creadoras de ambiente [26].

Los espacios eclesiásticos góticos se caracterizan, por tanto, por su gran luminosidad interior. Se mantiene el eje Este-Oeste para la directriz principal de la iglesia, por lo que se recibe gran cantidad de luz directa de los ventanales laterales orientados al Sur y gran cantidad de luz difusa de los ventanales laterales orientados al Norte [Figura 14].



Figura 11: Cripta del Monasterio de Germerode (Meissner, Hesse, Alemania), s.XII.

*“La luz es el poder de ver el cielo, y existe una diferencia entre la luz y la vista del exterior; se pueden tener vistas para los espacios inferiores de un edificio, pero no se puede obtener luz desde un lugar que es inferior.”- Corpus Juris Civilis [31].*



Figura 12: Catedral de Durham (Durham, Inglaterra), s. XI.



Figura 13: Abadía de Saint-Denis (Paris, Francia), s. XII-XIII.

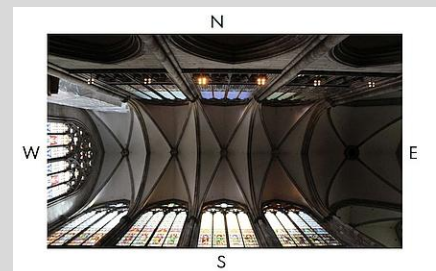


Figura 14: Diferentes entradas de luz. Catedral de Köln (Colonia, Alemania), s. XIII-XIX.



Figura 15: Hamman el Bañuelo (Granada, España), s. XI.



Figura 16: Celosía del Palacio de Comares. Alhambra de Granada (Granada, España), s. XI-XVI.

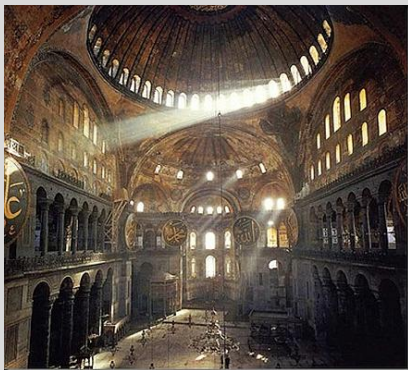


Figura 17: Iglesia de Santa Sofía (Estambul, Turquía), s. IV-IV.

*“Las ventanas de los templos deben ser de dimensiones medianas y estar muy elevadas, con el fin de que a través de ellos no puedan ver más que el cielo y de que los oficiantes ni los fieles aparten sus mentes lo más mínimo de la divinidad. [...] Añade el hecho de que las llamas, consustanciales con los templos se debilitan en un ambiente demasiado luminoso.”- Leone Battista Alberti [32].*

En Al-Ándalus, la cultura islámica y sus condiciones climáticas determinan fuertemente la morfología urbana y arquitectónica; el patio aparece como un medio para acondicionar el aire exterior y controlar las condiciones de iluminación antes de pasar a las estancias interiores. Sus dimensiones se estudian para controlar la incidencia directa del Sol, así como la presencia de vegetación y de elementos de agua como los estanques o las fuentes es vital para controlar las condiciones térmicas.

Para filtrar y controlar la presencia solar directa así como para proporcionar intimidad en los espacios interiores se abren múltiples pequeños huecos en espacios como los baños [Figura 15] o se introducen celosías en los huecos de mayor tamaño, proporcionando una atmósfera de múltiples puntos de luz [33] [20] [30] [Figura 16].

Por otro lado, en Bizancio se desarrolla, a partir de los textos clásicos, el sistema de cúpulas sobre pechinas permitiendo, entre otras, la múltiple perforación de la base de la cúpula [3], así como el uso de superficies reflectantes como los mosaicos y los espejos para difundir la luz. El historiador bizantino *Procopio de Cesarea* afirmaba acerca de la cúpula de *Santa Sofía* [33] [Figura 17] que *“No parece reposar sobre una construcción maciza, sino estar suspendida del cielo por una cadena de oro y formar como un dosel sobre la iglesia”*.

Durante este periodo, desde el tratado de *Vitruvio*, hasta la llegada del Renacimiento, no se tiene constancia de la existencia de textos de carácter «normativo» para transmitir los conocimientos adquiridos, sino que se transmitían fundamentalmente de forma oral, o se recogían en dibujos e información gráfica en los cuadernos de los maestros de obras.

Con la caída de Constantinopla, los exiliados de Bizancio llegan a Italia con los textos clásicos, donde, tras la Peste Negra y la crisis del feudalismo, empiezan a nacer las ciudades-estado y una visión antropocéntrica del mundo.

Los artesanos de la construcción se denominan a sí mismos arquitectos y aparecen diversos escritos sobre arquitectura, derivados fundamentalmente del tratado de *Vitruvio*, dando fin a un largo periodo de sequía en cuanto a textos arquitectónicos y de construcción de referencia se refiere. Entre los más importantes se encuentra el tratado del arquitecto *Leone Battista Alberti*, *‘De re aedificatoria’* (1452), de gran relevancia durante el Renacimiento.

Las reflexiones sobre iluminación natural que *Alberti* plasma en sus escritos parecen derivadas de su experiencia personal, mencionando cuestiones generales de orientación y sensación lumínica, así como indicaciones en cuanto al orden de magnitud de los huecos, tratando quizás de extrapolar los resultados obtenidos a futuras edificaciones en base a la experiencia de iluminación natural obtenida.

En el Renacimiento se recuperan el arco de medio punto, la bóveda de cañón, la cúpula semiesférica y la cubierta plana con casetones, adaptándolos a las nuevas necesidades [3] [20]. En las iglesias de planta basilical [Figura 18] se reduce la altura, predominando la horizontalidad. La direccionalidad de la nave se marca mediante la cubierta plana con casetones iluminada bilateralmente. La gradación de la luz marca la jerarquía en el espacio.

Resurge la tipología central donde no existe ninguna direccionalidad dominante, dando como resultado la intencionalidad de una iluminación natural uniforme [Figura 19].

Se comienzan a realizar experimentos para aumentar el tamaño de las bóvedas, dando lugar a la creación de las cúpulas de doble envolvente [3], como el caso de la cúpula de *Santa María del Fiore*, inspirada en la doble estructura del *Pantheon* [Figura 20]. Estos espacios intermedios entre ambas cúpulas se convertirán en los primeros conductos de luz, aunque no quede constancia escrita de esta intencionalidad, sino que surgen como un producto derivado al que posteriormente se le daría utilidad.

El desarrollo del dibujo, la perspectiva y, con ello, el diseño arquitectónico, permitió la evolución de la sencillez del espacio del primer renacimiento hacia el enriquecimiento de las formas, más cercanas al manierismo [Figura 21]. El dominio de la perspectiva no sólo se traduce en la configuración de los espacios interiores sino que tiene gran relevancia en la creación de los nuevos espacios urbanos.

En este renacimiento más maduro siguen surgiendo diversos escritos. Destaca por su relevancia el tratado de *Andrea Palladio*, '*I quattro libri dell'Architettura*' (1570), donde se explica de forma más concreta la dimensión de los huecos en función a valores relativos de la estancia en que se ubican [34].



Figura 18: Iglesia de San Lorenzo (Florencia, Italia), *F. Brunelleschi* 1418-1470.



Figura 19: Iglesia de Santa María della Consolazione (Todi, Italia), *D. Bramante* 1508-1607.

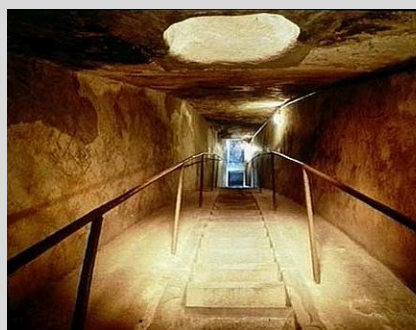


Figura 20: Intersticio de la doble estructura de la Cúpula de Santa María del Fiore (Florencia, Italia), *F. Brunelleschi* 1420-1436



Figura 21: Interior de la Iglesia de San Pedro del Vaticano (Roma, Italia), *D. Bramante, M.A. Buonarroti* 1678-1684.

*“Los claros de las ventanas deben ser iguales en tomar luz, y no estar más distantes o próximas entre sí que lo que la necesidad exija: se debe tener atención a la magnitud de los aposentos que deben alumbrarse por ellas, necesitando más luz la pieza más grande que la pequeña. [...] no deben abrirse ventanas más anchas que un cuarto de la anchura de los aposentos, ni más estrechas que un quinto: su altura será dos cuadrados y un sexto de su anchura.”- Andrea Palladio [34].*

*“Las ventanas deben tener la parte superior un poco redondeada, por los lados algo más anchos por el interior que por el exterior [...] las ventanas de las iglesias deberán estar provistas de vidrios transparentes y no pintada por ninguna parte.”- San Carlos Borromeo [35].*



Figura 22: Grada exterior. Iglesia del Gesù (Roma, Italia), J. Vignola 1568-1571.



Figura 23: Énfasis del Altar mayor dejando las capillas laterales en penumbra. Iglesia del Gesù (Roma, Italia), J. Vignola 1568-1571.

Palladio no sólo deja constancia de la importancia de las proporciones de los huecos sino que además introduce las distancias entre edificios y anchura de calles, facilitando medidas que son fruto más de la intuición y experiencia heredada que de cálculos numéricos reales.

El barroco se convierte en seña de identidad de la nueva Iglesia Católica de la Contrarreforma, nacida tras el Concilio de Trento (1545-1563), provocando su gran expansión.

En el Barroco los edificios se iluminan de día con la luz natural que entra por las ventanas. Se colocan visillos para tamizar la luz y cortinas para pararla, el vidrio se coloca hacia afuera. La luz se convierte en «divina», utilizando la luz reflejada. No vemos el origen de la luz, que, llega de una manera misteriosa [26]. Los espacios religiosos son una puesta en escena del poder de la nueva iglesia y de su misticismo.

En este sentido, el cardenal italiano *San Carlos Borromeo* escribió en el año 1577 las *'Instrucciones de la Fábrica y del Ajuar Eclesiásticos'* [35]. La importancia de dicha obra fue fundamental para la reorganización y el desarrollo de la construcción de las iglesias católicas después del *Concilio de Trento*.

En primer lugar recomienda en emplazamiento de las iglesias sobre una pequeña elevación o grada de 3 a 5 escalones [Figura 22] y procurar ser exentas; lo cual incidirá en las condiciones de iluminación de las mismas al distanciar las posibles obstrucciones de sus ventanas.

Se vuelve a la planta de cruz latina, no de círculo, pues ello corresponde a costumbre pagana, orientando la directriz de la nave mayor *“hacia el oriente y no se sitúe nunca completamente hacia el oriente solsticial, sino hacia el equinoccial”*.

El altar mayor cobra importancia elevándose sobre una grada y siendo el foco de la iluminación para tener una mayor visibilidad. La nave se hace espaciosa y se incide en una buena iluminación, dejando las capillas laterales en penumbra y en los intercolumnios para no distraer la visión del altar mayor [Figura 23].

Respecto a los revestimientos interiores comenta la calidad del pavimento indicando *“que no se disponga de espigado, ni de ladrillejos cocidos, ni con otra obra de enladrillado, sino vidriado, pero al menos en una iglesia insigne y capillas mayores, y en otras de preclara estructura, el adoquinado sea de mármol u otra piedra sólida”*. También introduce la presencia de láminas doradas, de plata o de bronce, así como el uso del mármol.

Se establecen recomendaciones sobre la ubicación de las ventanas en las naves de la iglesia, “*debiendo disponerse ventanas laterales [...] y construidas en medio de cada intercolumnio en tal orden, que quede la una frente de la otra, y no disten mucho del friso o del epistilo del techo* [Figura 24]. [...] *También ha de construirse una ventana orbicular, amplia según la medida de la iglesia, a semejanza de ojo, por el frente sobre la entrada mayor, justamente desde donde la iglesia y la capilla mayor reciban luz* [Figura 25]”, y continuando con el número y forma de los huecos “*Pero también puede recibirse la luz para uso de la capilla y de la iglesia, desde la cúpula, con linternas hechas por todas partes. [...] En la capilla mayor, y además en cada una de las menores, según su magnitud y medida, por uno y otro lado, hágase ésta igualmente de tal modo que por todas partes se suministre luz*”.

Como puede comprobarse, las indicaciones de *San Carlo Borromeo* sobre la construcción de las iglesias católicas serán determinantes en cuanto a la admisión y distribución de la luz natural en sus espacios interiores.

La necesidad de impresionar y de dar majestuosidad a los espacios y rituales religiosos encuentra en las formas del barroco, tras la superación del formalismo ornamental, y su complejidad geométrica su lenguaje de transmisión de estos ideales, siendo *Bernini* y *Borromini* sus máximos representantes. Frente a la luz universal del Renacimiento, en el Barroco se apuesta por la luz instantánea [36].

Los documentos de este periodo en el ámbito arquitectónico son fundamentalmente gráficos. Se sabe de algunos tratados [37], como el de *Francesco Borromini*, ‘*Opus Architectonicum*’, y *Guarino Guarini*, ‘*Euclides adauctus*’, pero gran parte del primero fue destruido por el mismo autor, y el segundo trata el tema de la geometría descriptiva, por lo que no queda registro escrito sobre los experimentos e intuiciones sobre luz natural que tuvieron lugar en esta época.

*Bernini* renueva el modelado de las formas y varía los órdenes arquitectónicos en función de la relación materia-luz. Tiene una conciencia clara del valor y significación de la luz: no hay formas sin luz, y en la oscuridad toda forma deja de ser perceptible. A la dosificación de las fuentes de luz directas e indirectas, así como a la sucesión de espacios con distinto grado de iluminación, utilizando la luz general en combinación con la luz rasante para resaltar las formas es lo que se conoce como «*luz a la Bernini*» [Figura 26] [38].

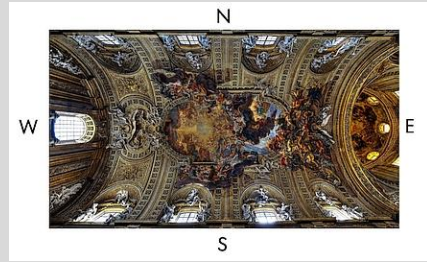


Figura 24: Distribución de las ventanas laterales de la nave y el óculo sobre la entrada. Iglesia del Gesù (Roma, Italia), J. Vignola 1568-1571.



Figura 25: Óculo de la Iglesia del Gesù (Roma, Italia), J. Vignola 1568-1571.



Figura 26: Tumba de Alejandro VII. San Pedro del Vaticano (Roma, Italia), G.L. Bernini 1678.



Figura 27: Lucernario oculto. Éxtasis de Santa Teresa. Capilla Cornaro, Iglesia Santa María de la Victoria (Roma, Italia), G.L. Bernini 1647-1652.



Figura 28: Rotonda Sant'Andrea al Quirinale (Roma, Italia), G.L. Bernini 1658-1670.



Figura 29: Separación e iluminación del altar mayor. Rotonda Sant'Andrea al Quirinale (Roma, Italia), G.L. Bernini 1658-1670.



Figura 30: Vista interior del conducto de luz del altar. Rotonda Sant'Andrea al Quirinale (Roma, Italia), G.L. Bernini 1658-1670.

Si bien en el renacimiento nacen los primitivos conductos de luz, en el barroco se complejizan y se les añaden superficies de alta reflectancia para, si bien no ejercer un control como tal de la luz, simular el efecto óptico. Es el caso del *Éxtasis de Santa Teresa* en la *capilla Cornaro* en Roma [Figura 27], de *Bernini*, donde la iluminación de la escultura se basa en un juego de reflejos de la luz sobre las superficies altamente reflectantes para dar un sentido mítico al conjunto escultórico.

En *Sant'Andrea al Quirinale*, el gran luneto de entrada sobre el portal difunde la luz poniente sobre todo el diorama de la capilla [Figura 28]. Pero la luz no es sólo indirecta sino también directa. *Bernini* juega con la dialéctica de los contrarios [38].

La rotonda, elíptica tiene su eje más corto como eje principal de la iglesia: la relación con el espacio del altar se precipita mientras que el espacio de los fieles se hace más difícil de percibir. El espacio de los fieles se ilumina de forma general por los huecos de la bóveda, creando una atmosfera sombría en la parte baja junto con una bóveda altamente iluminada.

En contraste, el espacio del altar está separado del espacio principal por un diafragma de columnas [Figura 29], creando un espacio de transición en penumbra, altamente iluminado mediante la luz rasante proveniente de un conducto de luz oculto [Figura 30]. El espacio del altar, pensado como un lugar inaccesible, retirado detrás de la cortina de columnas en medio de una luz particular, es el que asume el valor dominante [36].

La arquitectura de *Gian Lorenzo Bernini* es un ejercicio sobre el tema de centralidad, tanto desde el punto de vista tipológico como planimétrico. La creación de estos conductos de luz, adornados con elementos escultóricos dorados en forma de rayos de luz, irradiando una luz particular sobre los objetos iluminados, provoca centros de atención en su arquitectura [38].

El rayo de luz de oro de *Bernini*, que deja caer a través del espacio en la *Cattedra Petri*, en el ápice de San Pedro, ha encontrado docenas de imitaciones como representación física de la luz divina.

En otros ejemplos arquitectónicos mostró cómo la utilización de aberturas de luz disimuladas y ocultas, especialmente las «cámaras de luz» anexas, permiten precisar la dirección de la luz con medios arquitectónicos [26].



Por otro lado, *Borromini* sigue utilizando la iluminación natural de manera esencialmente intuitiva, basándose fundamentalmente en la utilización de la luz rasante para resaltar los volúmenes de las diferentes componentes arquitectónicas de la fachada, jugando con resaltes, convexidades y concavidades, produciendo efectos diversos en las sombras que se proyectan [Figura 31].

Búsqueda en el interior de la arquitectura: elaboración entre puntos geométricos fijos, trazos de compás, expresión manual del trazado. Afronta el lenguaje arquitectónico a través del registro de los temas y de los problemas, de las soluciones y de las inquietudes.

*“La arquitectura de Borromini, como se ha dicho, tiende a segregar el edificio del ambiente: por ello se preocupa de situarlo en una condición de luz “particular”, que sea exclusivamente suya y lo aisle de la luminosidad difusa natural. [...] La luz, de cualidad del espacio se transforma en cualidad de la forma; y este tránsito corresponde de hecho al tránsito de la iluminación universal a la iluminación particular. [...]”* [39]

También el poder político toma la riqueza formal del barroco como medio para mostrar su esplendor. Tal es el caso de la *Galería de los Espejos*, en el *Palacio de Versalles* [Figura 32]. En este tipo de espacios, donde se requiere una gran cantidad de luz, como las galerías expositivas, los huecos adquieren mayor dimensión hasta prácticamente cubrir casi todo el paramento en que se ubican. En el caso de Versalles, la incorporación de los espejos y demás superficies reflectantes transforma el espacio iluminado unilateralmente en un espacio iluminado casi bilateralmente, creando una atmósfera de gran luminosidad.

La luz artificial en el Barroco no está en función de la arquitectura sino que está asociada a la actividad de la persona, apareciendo nuevos tipos de lámparas más sofisticadas [26]. Comienza a normalizarse el uso del alumbrado urbano, inicialmente mediante dispositivos primitivos, como varias velas encerradas en una caja de vidrio (1667), para evolucionar hacia el uso de farolas de aceite (1669) e incluso establecer una regulación horaria (1694) [20].

En la era de la razón nacen escritos como *‘Opticks’* de *Isaac Newton* [40] primer acercamiento científico respecto a las propiedades de la luz. Se recupera el estilo clásico despojándolo de cualquier elemento de superficialidad como expresión de la búsqueda de la verdad.



Figura 31: Sant'Ivo alla Sapienza (Roma, Italia), F. Borromini 1642-1660.



Figura 32: Galería de los espejos. Palacio de Versalles (París, Francia), Jules Hardouin Mansart 1678-1684.

*“El arte de conmovir por los efectos de la luz pertenece a la arquitectura, [...] el artista, que debe conocer los medios para hacerse su dueño, puede atreverse a decir: yo hago luz [...]”*

*Hace falta que la luz produzca los efectos más generales, los más sorprendentes, los más variados, los más multiplicados, [...] conformar por medio de los materiales que absorban la luz, la imagen oscura de una arquitectura definida por el efecto de la sombra... [...] Es la luz la que produce los efectos [...]”*

*Si puedo hacer que la luz llegue directamente y hacerla penetrar sin que el espectador perciba de dónde viene, los efectos resultantes de una claridad misteriosa producirán efectos inconcebibles y una especie de magia encantadora”- Étienne-Louis Boullée [41].*

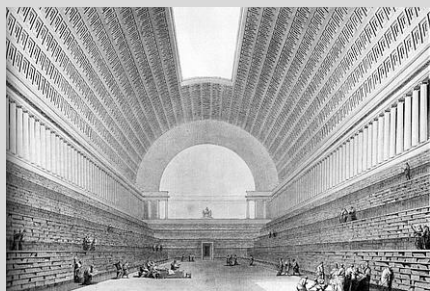


Figura 33: Proyecto para la Biblioteca de los Reyes, E-L. Boullée 1785.



Figura 34: Museo del Prado (Madrid, España), J. Villanueva 1785-1818.



Figura 35: Dulwich Picture Gallery (Londres, UK), Sir John Soane 1817.



Figura 36: Cúpula balaustrada de la Cripta Casa-Museo Soane (Londres, UK), Sir John Soane 1837.

Se formulan las leyes de la mecánica y con ellas nace la ciencia de la construcción: se estudia la resistencia de los materiales y las soluciones constructivas. La ciencia llega a la edificación mediante la racionalización de las técnicas constructivas, así como del uso de los materiales: piedra, ladrillo y madera [42].

Se inventa el primer luminancímetro subjetivo en 1700 y se comienzan con las primeras mediciones fotométricas del cielo (1729, 1760) y de la luz solar directa. En este momento, *Lambert* formula la *ley del coseno* y la aplica a sus cálculos fotométricos [21].

Este sentimiento de la racionalidad lleva a la reinterpretación del repertorio formal clásico, surgiendo de este modo el neoclasicismo como lenguaje insignia del pensar de esta época. El fomento de la racionalidad lleva a la creación de las Bibliotecas [Figura 33] y los Museos Nacionales [Figura 34] como medios de divulgación.

Los escritos de *Francesco Milizia*, '*Principi di Architettura Civile*' (1781), del abate *Marc-Antoine Laugier*, '*Essai sur l'Architecture*' [43], critican los excesos de las obras del alto renacimiento, manierismo y, sobre todo, del barroco, pero no aportan indicaciones sobre las condiciones de iluminación natural de los edificios neoclásicos. Fue *Étienne-Louis Boullée* quien habla de la luz natural en la arquitectura, pero se puede observar que el discurso es reflexivo y de carácter poético, en un momento en el que domina la razón y el carácter científico aplicado a la arquitectura [42].

En este contexto surge *Sir John Soane*, que resume en su historia los ideales románticos y neoclásicos que representaban la cara y la cruz de la Europa de los siglos XVIII y XIX. Becado por la *Royal Academy*, pasó dos años de su juventud en Italia, que se convierte en fuente de su arquitectura. Para admitir la luz en sus edificios, su obra incorpora chimeneas de luz, óculos, cúpulas colgantes, grandes ventanales... fundamentalmente elementos de iluminación cenital [Figura 35], siendo éstos las herramientas para resolver sus preocupaciones museográficas.

En su *casa-museo* [Figura 36], la luz es el elemento unificador que ordena el recorrido; hasta tal punto que en su momento ésta no se abría al público en aquellos días en los que la luz no fuera la idónea [44]. En cada una de las habitaciones la iluminación del espacio y de las obras de arte cobra una importancia fundamental, en la que los juegos de cristales, colores y alturas hacen de la luz imprescindible para la creación de diferentes ambientes.

La iluminación de la casa-museo se basa principalmente en luz cenital o clerestoria imprimiéndole a todos los espacios cualidades óptimas para convertirse en espacios expositivos.

Las preocupaciones de Soane sobre la iluminación de elementos pictóricos se plasman en la luz clerestoria de la sala de pinturas, realizada a través de un vidrio claro, proporcionando una luz general que permite apreciar las pinturas sin colorearlas [44].

En 1792 la necesidad de evaluar y comparar diferentes formas de iluminación para ser empleadas en naves militares en Múnich da lugar al empleo de la fotometría con fines industriales. Ésta se utilizó para cuantificar el valor lumínico de los diferentes combustibles y los diferentes tipos de lámparas existentes para quemarlos. Un aspecto importante fue que aunque las diferencias entre las lámparas no eran directamente detectables mediante observación casual, se aceptaban como reales bajo medición fotométrica [45]. La primera iluminación pública de un edificio mediante el gas fue realizada en el *Hotel Seignelay* de París, en 1801, por el ingeniero francés *Philippe Lebon* [26].

El desarrollo del conocimiento durante la Ilustración y la irrupción de la Revolución Industrial trajeron consigo el desarrollo de la industria del hierro y del vidrio, entre otros, llevando a la producción de ventanas más grandes y baratas de forma masiva [21].

La estructura metálica se incorpora a la edificación [Figura 37] liberando de carga a los cerramientos, que se llenan de vidrio [42]. Las fábricas y grandes naves industriales sufren un gran desarrollo, naciendo tipologías específicas para ellas, iluminadas en general cenitalmente [1] [Figura 38].

La producción industrial del vidrio y la estructura metálica facilitó el desarrollo de los edificios de varias plantas con grandes ventanas y «muros cortina» [21].

Se sabe que la profundidad de los espacios en edificios de varias plantas se limitaba en función de la altura de la ventana, así como la sistemática incorporación de patios de luces cuando así se requería. Es una época de grandes cambios, pero sin constancia de la forma en que se afrontaba la iluminación natural de los edificios [3].

También la iluminación artificial sufre un gran avance tecnológico, dando lugar a las primeras lámparas: *Argand* (1783), *Davy* (1815), *luz de calcio* (1816), *lámpara incandescente* (1820) o la *lámpara de arco eléctrico* (1843) [20] [Figura 39].

*“La «luz misteriosa», tan exitosamente practicada por los artistas franceses, es el agente más poderoso en las manos de un genio, y su poder no puede ser comprendido en su totalidad, ni siquiera altamente apreciado. Es, como siempre, poco atendida en nuestras arquitecturas, y por esta obvia razón es por lo que no sentimos suficientemente la importancia del carácter de nuestros edificios, para los que el modo en que se admite la luz apenas tiene relevancia.”*– Sir John Soane [30].



Figura 37: Galería de Víctor Manuel II (Milán, Italia), G. Mengoni 1865.



Figura 38: Edificios industriales iluminados naturalmente con luz cenital y clerestoria.

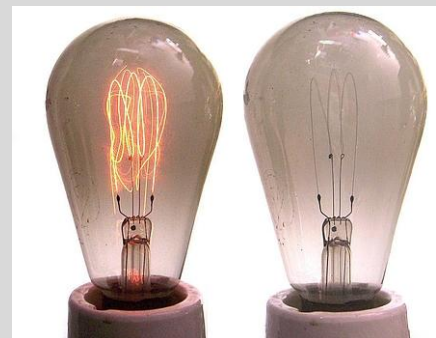


Figura 39: Lámpara incandescente con filamento de carbón.



Figura 40: Iluminación artificial de nave industrial.



Figura 41: Barrios obreros entorno a los centros industriales.

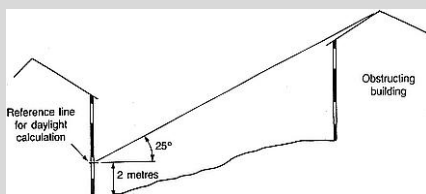


Figura 42: Esquema de cumplimiento de la servidumbre de luz natural [46].

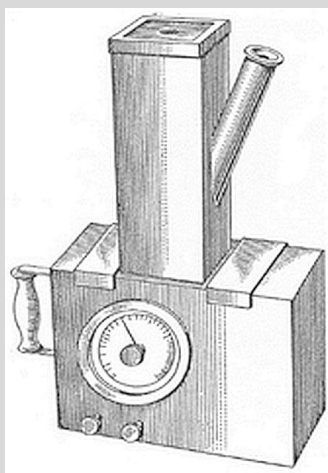


Figura 43: Luxómetro de Trotter (1911) [47].

Se comienzan a iluminar los espacios de trabajo, como la sala de máquinas de los talleres *Boulton & Watt* en el *Soho*, en 1801. En 1806 facilitó la iluminación de la fábrica textil *Phillips & Lee* en Salford, en aquel entonces una de las mayores de Inglaterra.

El interés primordial de los investigadores es satisfacer la demanda de una iluminación que permitiese trabajar de noche, con razonable eficiencia, en las fábricas. El gas resolvió este problema contribuyendo notablemente a la expansión industrial en la época victoriana, hasta que fue superado por la iluminación eléctrica [26] [Figura 40].

Alrededor de 1830 la fotometría forma parte integrada de la información competitiva que describe las diferentes fuentes de iluminación, siendo un requisito legal en la industria de iluminación a gas en torno a 1860 y el árbitro del valor luminoso de las diferentes lámparas existentes en 1890 [45].

Como consecuencia de la expansión industrial, crecen los barrios obreros cerca de las fábricas, formados generalmente por edificios de dos o tres plantas, sin ningún tipo de planificación y en continuo crecimiento en altura y extensión, dando lugar a unas condiciones de vida de muy baja calidad y apenas un acceso mínimo a la luz natural [42] [Figura 41].

En 1832 se crea la servidumbre de luz [48]. *Robert Kerr*, arquitecto y profesor de construcción en *King's College*, en su tratado '*On ancient lights*' [49], clasifica el tipo de iluminación, así como de las obstrucciones, empleando la regla proporcionada por *Vitruvio* [Figura 42] e incluyendo las disposiciones legales sobre iluminación natural del emperador *Justiniano I*; incluye un esquema gráfico para medir la iluminación difusa, en términos de «medidas de luz» (*measures of light*).

Esto se vio reforzado por la presión de acomodar, a finales del siglo XIX, en las ciudades del mundo desarrollado, a un número cada vez mayor de personas, dando lugar a edificios más altos y más próximos, reduciendo, y en ocasiones eliminando completamente, la visión directa del cielo de muchas de las estancias interiores [50].

Esta situación llevó a la necesidad de poder medir la cantidad de luz en un espacio de forma objetiva [50], especialmente para determinar los casos afectados por la servidumbre de luz, dando lugar al desarrollo de los primeros luxómetros [21] [Figura 43], y a la primera definición del *Factor de Iluminación Natural (FIN, Daylight Factor -DF)* (1895), como medida de la iluminación difusa [51].

Asimismo se propone la estandarización internacional de un sistema de medidas fotométricas (1896) [21]. Pese al desarrollo tecnológico de la iluminación artificial, la luz natural es todavía la fuente de iluminación prevalente para la elaboración de trabajos manuales y clericales [50] [Figura 44].

Las condiciones de los trabajadores y los valores del capitalismo a principios del siglo XX de la Europa industrializada provocó una profunda crisis, momento en el que surgen las vanguardias artísticas, como reacción al encasillamiento artístico latente en esa época [42].

Con la aparición del ascensor (1853) y el desarrollo de la iluminación artificial desde la bombilla eléctrica incandescente (1854) a la lámpara de neón (1907) [3] [4] [20], la arquitectura comienza a ver resueltas las cuestiones de confort mediante la incorporación de estas nuevas tecnologías. El empleo de los nuevos materiales tales como el hormigón, y su evolución hacia el hormigón armado [Figura 45], permiten crear edificios en los que la estructura se independiza de la envolvente, quedándose ésta sólo como intermediaria entre el interior y el exterior.

En 1906 se crea la *Sociedad Americana de Ingenieros de Iluminación (IESNA- Illuminating Engineering Society of North America)*, un cuerpo para incorporar no sólo aquellos agentes directamente asociados a la producción de iluminación, sino también artistas y arquitectos, físicos y químicos, oftalmólogos y fisiólogos, todos ellos implicados indirectamente. En 1909 surge su homóloga británica: la *Sociedad de la Luz y la Iluminación (Society of Light and Lighting -SLL)*.

En este contexto, aunque se reconocía la importancia de la iluminación, ésta funcionaba con gas, petróleo, acetileno y electricidad. Varias compañías se encontraban compitiendo por la supremacía para proporcionar la energía así como el equipamiento necesario de iluminación. Estas sociedades, por tanto, fueron el foro de discusión y comparación de los sistemas emergentes de forma objetiva y su aplicación a los espacios de trabajo [Figura 46].

En 1911 se crea el *Comité Internacional de la Iluminación (CIE- Commission Internationale d'Eclairage)* en base a la colaboración de varias instituciones nacionales. Como organismo internacional, proporciona un foro de debate internacional e imparcial que trabaja para normalización de las unidades de medidas de iluminación [52].

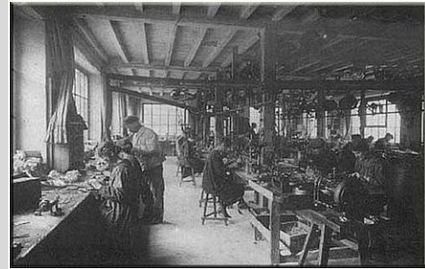


Figura 44: Prevalencia de la luz natural en talleres.



Figura 45: Crecimiento de edificios en altura debido a las nuevas tecnologías. Madison Square Parks, Nueva York, USA (1912).



Figura 46: Iluminación de oficina, alrededor de 1910 [52].

*“En el norte y en el trópico no reciben la luz a 45 grados, que es la que mejor ilumina los objetos para una visión perfecta; al haber escasez de luz o venir ésta de un modo demasiado cenital, los objetos con una iluminación inadecuada aparecen deformados;” - Antonio Gaudí.*

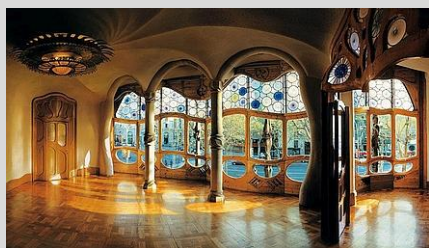


Figura 47: Casa Batlló (Barcelona, España), Gaudí 1904-1906.



Figura 48: Unity Temple (Illinois, USA), F.L. Wright 1905-1908.



Figura 49: Unity Temple (Illinois, USA), F.L. Wright 1905-1908.

En general, las nuevas teorías que se discuten acerca del Arte y del papel del artista, ven en la industria (y en la sociedad industrial) la manifestación máxima de todo el trabajo artístico: artificial, racional, preciso, finalmente, moderno. Este conjunto de ideas ve en la arquitectura la síntesis de todas las artes. Siendo así, el campo de la arquitectura abarca todo el ambiente habitable, desde los utensilios de uso doméstico hasta toda la ciudad [42].

En España, *Antonio Gaudí*, en su etapa naturalista, creaba obras como la *Casa Batlló* [Figura 47] donde la luz se convierte en protagonista de los espacios. Pese a que se define su arquitectura como escultórica, *Gaudí* matiza la diferencia entre arquitectura y escultura en clave de iluminación natural: *“La arquitectura es la ordenación de la luz; la escultura es el juego de la luz”*.

En Estados Unidos, dentro de la búsqueda de una arquitectura funcional, surgen arquitectos como *Frank Lloyd Wright* marcando la tendencia de la arquitectura orgánica, del mismo modo en que *Erik Asplund* y *Arne Jacobsen* lo hacían en el norte de Europa.

Hablando sobre el *Templo Unity* [Figura 48] [Figura 49] *Frank Lloyd Wright* diría [53]: *“Las grandes columnas estructurales estaban dispuestas en planta para formar una doble capa de nichos en los cuatro lados del espacio. Inundé estos nichos laterales con luz cenital para obtener la sensación de un alegre día despejado en el espacio. Y con este sentimiento respecto a la luz el techo central entre estas cuatro grandes columnas se convirtió en un lucernario, la luz natural se colaba a través de las intersecciones de las vigas de hormigón y se filtraba a través de las luces de cristal ámbar del techo. Controlado la luz natural de este modo, ésta tendrá siempre, llueva o salga el Sol, la calidez de la luz solar. La luz artificial vendrá de allí también por la noche. Este esquema de iluminación era integral, daba difusión y mantenía el espacio despejado.”*

El momento de explosión definitiva de las vanguardias artísticas coincidió con la *1ª Guerra Mundial*, con la conciencia del absurdo sacrificio que ésta significaba, y con la promesa de una vida diferente alentada por el triunfo de la revolución socialista en Rusia [42].

En Estados Unidos, las continuas quejas sobre las condiciones de trabajo en las fábricas y talleres llevan a la publicación, por parte de la *IESNA* en 1915, del primer *‘Código de Iluminación Artificial’*, estableciendo ya los niveles mínimos para el desarrollo de diversas tareas visuales [54].

El período de entreguerras (1918-1939) es el de los locos años veinte, época de desarrollo y prosperidad económica, tras la que vendría el gran desastre de la bolsa de Wall Street (1929) y la depresión de los años treinta: una época de recesión y conflictos, que presencia el surgimiento de los totalitarismos fascista y soviético como alternativas al liberalismo de las democracias capitalistas, desembocando en la 2ª Guerra Mundial.

En este periodo se gestan las bases de la arquitectura moderna mediante los trabajos de la *Staatliche Bauhaus* y los trabajos de *Le Corbusier* en la Francia republicana [42].

En el caso de *Le Corbusier*, ya desde sus primeros escritos anuncia una nueva arquitectura, '*Vers une Architecture*' [55], mediante la incorporación de la lógica funcional de la industria a la arquitectura.

La luz (natural) adquiere una gran importancia, pero da la impresión por sus escritos, de que se refiere a su cualidad para definir volúmenes, no llegando a profundizar en las condiciones interiores de iluminación natural [Figura 51]. Las referencias a la luz como definidora de volúmenes son múltiples en sus escritos, sin embargo, no se dan indicaciones sobre las condiciones lumínicas interiores.

Respecto a los desarrollos tecnológicos, en 1921, *Willis H. Carrier* patentó la *Máquina de Refrigeración Centrífuga* siendo el primer método para acondicionar el aire en grandes edificios: industrias, teatros, grandes almacenes, hospitales y oficinas [56]. El equipo destinado a uso residencial se crea en 1928, pero no se expandió hasta después de la 2ª Guerra Mundial.

La presión creada por los requerimientos normativos [54] y el abaratamiento de la luz eléctrica (1924) [4], entre otros factores, impulsó el desarrollo tecnológico como la creación de la *lámpara fluorescente* (1926), de gran expansión en los siguientes años [3], o la creación de métodos de cálculo de iluminación artificial como el *método Lumen* o *de las cavidades zonales* (1928) [51].

Contemporáneamente, la *CIE* adopta en 1924 la *distribución espectral del rendimiento visual fotópico* [21], que derivó en la aceptación internacional de la *candela*, el *lumen* y el *lux* como unidades de medida de iluminación [52]. Surge el *método Waldram* (1923) para calcular el porcentaje de exposición al cielo de un elemento [1] [21] [57] [Figura 52].

*"[...] nuestros ojos están hechos para ver formas en la luz, la luz y la sombra revelan estas formas, los cubos, conos, esferas, cilindros o las pirámides son las grandes formas primarias que la luz revela"* -Le Corbusier [Figura 50].

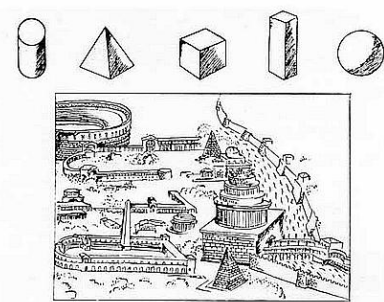


Figura 50: 'La lección de Roma' de L'esprit nouveau n.14, Le Corbusier 1922-23.

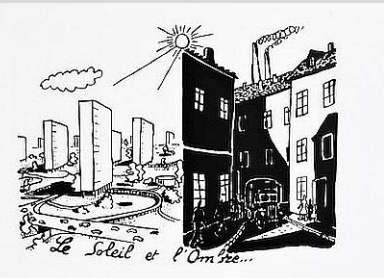


Figura 51: Le ville contemporaine, Croquis de Le Corbusier 1922.

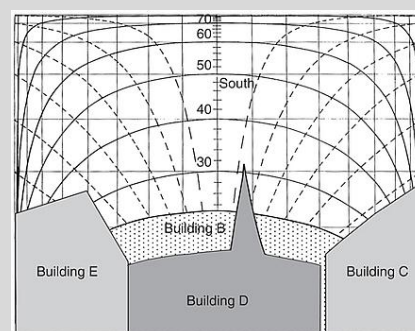


Figura 52: Cálculo de la componente de cielo utilizando el método del Diagrama de Waldram.

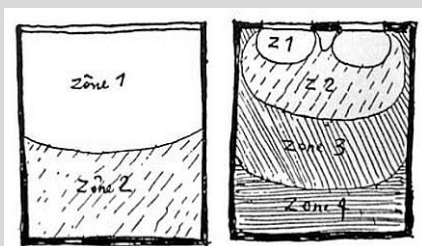


Figura 53: Estudio comparativo de los niveles de iluminación proporcionados por ventanas verticales u horizontal, *Le Corbusier* [58].

*“la mejor iluminación para las estancias es la cenital; como la luz natural, la iluminación cenital baña los espacios desde arriba, produciendo menos sombras que la iluminación lateral, que además no es constante y depende de la orientación.”-* Alvar Aalto [Figura 54].



Figura 54: Biblioteca de Viipuri (Vyborg, Finlandia), *Alvar Aalto* 1927-1935.

*“El Sol debe entrar en cada vivienda varias horas al día incluso en la estación en la que la luz solar es más escasa. La sociedad no va a tolerar más situaciones en las que toda una familia es privada del Sol y condenada a una salud precaria. Cualquier proyecto en el que las viviendas se orienten al norte será condenado. Se exigirá la entrega de un diagrama que demuestre que el Sol entrará en cada vivienda durante al menos dos horas en el solsticio de invierno. El soleamiento es el nuevo y más imperativo deber del arquitecto.”-* Carta de Atenas 1933-1942. Artículo 26.

La evidencia de la mejora en la productividad de los espacios de trabajo con nivel de iluminación suficiente, y la cada vez menor disponibilidad de luz natural en las ciudades debido a la densificación de las mismas [54], centraron los esfuerzos en el desarrollo y expansión de la iluminación artificial, llegando a obviar cualquier aportación natural en los espacios de trabajo. Esto supuso un freno en la evolución de la disciplina de la iluminación natural, cuyas aportaciones aparecen en la siguiente década del siglo XX, proliferando edificios que se independizan de las condiciones exteriores.

En 1926, *Le Corbusier* propone los cinco puntos de la arquitectura, entre los que se incluye la liberación de la fachada y la ventana horizontal [42]. Para entender el cambio producido por la ventana horizontal, *Le Corbusier* presentó un esquema que compara las zonas de iluminación producidas por la misma superficie vidriada dispuesta en dos ventanas verticales y una horizontal de pared a pared [58] [Figura 53].

Mientras se evidencia la integración del estudio de la luz natural en *Le Corbusier*, en otros arquitectos, como *Alvar Aalto*, el uso de las herramientas disponibles no queda reflejado por escrito, aunque si se encuentran actitudes frente al carácter de la iluminación. Las preocupaciones y el sentimiento de esta época ante tantos cambios se ven reflejados en la clase ‘*Our architectonic concept of space*’ de *Erik Gunnar Asplund* (1931) [59]:

*“A pesar de los grandes nuevos retos – la imprevista concentración de población en nuestras ciudades, los cambios sociales y el crecimiento del tráfico. Con el uso de las anteriores reglas formales hemos tratado de llevar más luz al interior de los edificios de las manzanas de la ciudad, de permitir un mejor flujo de tráfico... Pero estos esfuerzos también han demostrado que apenas podemos esperar satisfacer las crecientes demandas de la ciudad si mantenemos nuestra anterior concepción arquitectónica del espacio”.*

La arquitectura comienza a reinventarse, dejando a un lado el formalismo heredado [42] y, con ello, la sabiduría inherente de las formas arquitectónicas anteriores con respecto a la relación entre la arquitectura y su medio ambiente, especialmente respecto a las condiciones de iluminación natural.

En 1933 se proponen los primeros métodos de cálculo de cargas de refrigeración basados en la temperatura superficial y las medidas de conductancia. La acción directa del Sol se considera mediante un factor de corrección [56].



En 1935 se publica en Alemania [60] uno de los primeros estándares relativos a la iluminación natural (*DIN 5034*) mientras que en 1936 se publican las primeras recomendaciones británicas sobre los niveles de iluminación según la tarea visual. Más tarde, estas recomendaciones se incorporarían al '*Indoor Lighting Code*' de la *IESNA*.

Alrededor de 1940 se inventa la *lámpara tubular fluorescente*, que proporciona una iluminación más económica que la bombilla incandescente y la posibilidad de unos mayores niveles de iluminación a partir de una cuadrícula regular de luminarias empotradas en el techo. Con esta tecnología los puestos de trabajo se pueden emplazar en cualquier lugar de una habitación [52] [Figura 55].

En 1944, las condiciones exteriores en el cálculo de las condiciones térmicas se consideran a través de la temperatura equivalente (*Sol-air*), se introduce el concepto de inercia térmica y desfase de las temperaturas, dando lugar a los primeros métodos de cálculo de sistemas de climatización [56].

Mientras durante la *2ª Guerra Mundial* se expande el uso de las lámparas fluorescentes en las oficinas de industrias armamentísticas; tras la guerra se dio énfasis a la iluminación de los edificios de oficina [54]. De hecho, en 1947 se publica el primer manual de iluminación de la *IESNA* (*IES Lighting Handbook*), cuyas revisiones periódicas continúan hoy en día.

Terminada la *2ª Guerra Mundial* los mayores esfuerzos se concentran en la reconstrucción de las ciudades y en la creación de un nuevo urbanismo [42], en cuyas claves se encuentran el adecuado acceso solar [Figura 56]: se plantea la idea de la construcción de edificios en altura a una distancia tal que no suponga una obstrucción [61].

Se extiende el uso masivo de los muros cortina [Figura 57], quizás debido a su rápida ejecución, altamente defendidos por *Philip Johnson* y *Mies van der Rohe*, para el que lo importante es el juego de reflejos y no el juego de luces y sombras.

En contraposición a los muros cortina, se encuentra *Luis Barragán*: "*Cualquier trabajo de arquitectura que no sea capaz de expresar serenidad es precisamente un error. Por ello es un error reemplazar la protección de los muros con el uso incontenido de ventanales enormes, cosa que impera hoy...*" y son los muros los que le permiten controlar la cantidad de luz que admite en sus espacios.



Figura 55: Imagen de la película '*El apartamento*' (1960).

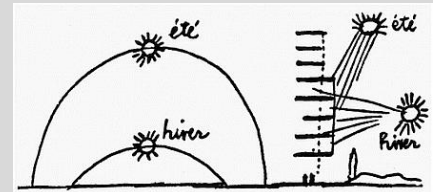


Figura 56: Estudio del movimiento aparente del Sol para la *Unité d'habitation* (Marsella, Francia), *Le Corbusier* 1946.



Figura 57: Interior del edificio *Seagram* (Nueva York, USA), *Mies van der Rohe* 1954-1958.

*"Desde la biblioteca veía yo el patio. Esto llegó a afectarme, no necesitaba tanta luz. Así que levanté un muro."* - *Luis Barragán* [Figura 58]



Figura 58: Control de la luz natural en la biblioteca de la casa de *Luis Barragán* (Tacubaya, México), *Luis Barragán* 1948

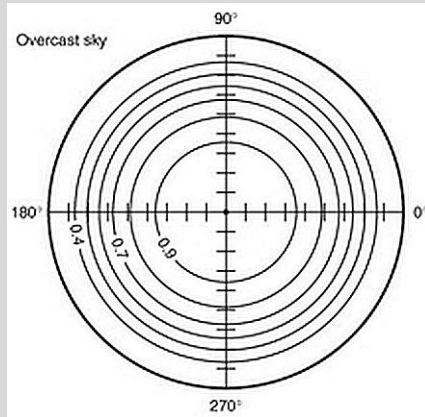


Figura 59: Distribución de luminancias del Cielo Nublado Estándar CIE [62].

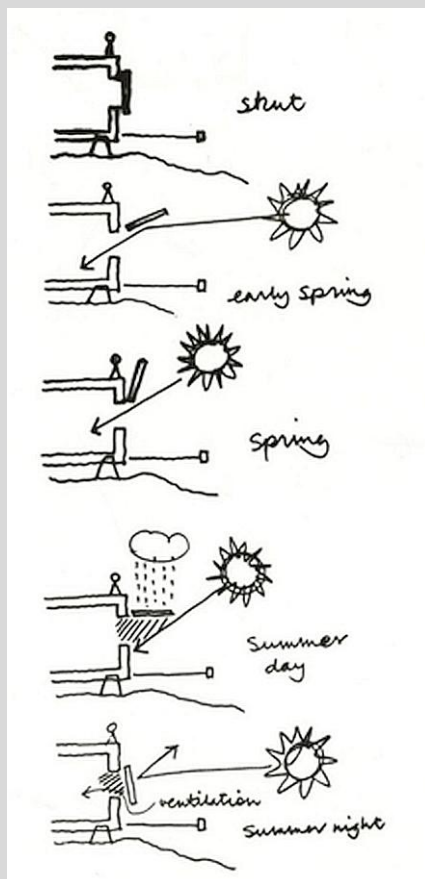


Figura 60: Esquema sobre la consideración del soleamiento en latitudes altas, R. Erskine 1959.

Es en este periodo cuando *Moon & Spencer* proponen el *Modelo de Cielo Completamente Nublado (Overcast Sky Model)* (1942) [Figura 59].

En Inglaterra el *Centro de Investigación de la Edificación (Building Research Establishment -BRE)* crea el *transportador de luz natural (Daylight Protractor)* (1946) y otras fórmulas y métodos relacionados con el cálculo del *DF* utilizando el modelo de cielo de *Moon & Spencer*: fórmula para la componente interior reflejada -*IRC formula*, el *método de granos de pimienta de Pleijel - Pleijel's Pepper-Dot Chart Method* o el *método de flujo dividido -Split Flux Method*, entre otros [52] [62].

También se propone la primera fórmula para evaluar el *deslumbramiento (discomfort glare)* (1950), se publican algunas recomendaciones sobre el uso de la luz natural de mano de *R.G. Hopkins* [52] y *R. Kittler* propuso su *Modelo de Cielo Despejado (Clear Sky Model)* (1955) [62] [63]. Poco después se crean las primeras computadoras, de gran relevancia para el desarrollo, en los siguientes años, de métodos computacionales y programas de cálculo [51].

La extensión y aceptación de los procedimientos de cálculo del *Factor de Iluminación Natural* se vio fomentada en Inglaterra por la vigencia y actualización de los derechos a la luz natural [64], afectando a la configuración urbana de aquellos entornos no modificados durante los últimos veintisiete años, así como se comienza a considerar las condiciones de iluminación natural desde un punto de vista analítico, con el objetivo de entender el efecto que la apariencia de la luz puede tener sobre los usuarios, en términos de rendimiento y de salubridad [52].

A principios de los años 50 se funda en *Team Ten* entre cuyas actividades estuvo la observación y estudios de arquitecturas vernáculas, como un medio para obtener las claves de una arquitectura anclada al lugar; como estrategia para optimizar, recursos y favorecer la aceptación de la nueva arquitectura. En cierta forma, es el nacimiento de la arquitectura bioclimática.

En este seno, *Ralph Erskine* creó toda una gramática arquitectónica a partir de su vivencia en Suecia, para ser utilizada en estas latitudes altas. Entre otras estrategias, hace especial consideración a las condiciones de soleamiento [Figura 60], para las que recomienda prestar atención a la inclinación del Sol según la época de año, aprovechar los reflejos en la nieve y en edificios para maximizar la escasa luz invernal y regular la luz de verano, especialmente al Sol nocturno.

Alison y Peter Smithson, pertenecientes del *Team Ten*, también son conscientes de la importancia del diseño arquitectónico en la iluminación interior del espacio [65], cuestión que abordan tanto en sus proyectos como en sus escritos.

Los requisitos cada vez más exigentes de confort promueven el crecimiento y uso de sistemas de acondicionamiento térmico y lumínico, creando y aumentando la brecha en la relación entre la arquitectura y su entorno: se evidencia aquella incipiente ruptura que anunciaba *Asplund* entre la arquitectura y sus condiciones ambientales exteriores.

Phillip Johnson expresa este pensar en *'The seven crutches of modern architecture'* (1955), colocando al confort ambiental en el cuarto lugar. *"El control ambiental empieza a reemplazar a la arquitectura. Pronto estarás haciendo casas con ambientes controlados que no serán muy difíciles de hacer salvo que puedes tener una ventana al oeste y no podrás controlar el Sol. No existe voladizo en el mundo o carta solar que pueda ayudarte."* Se deduce que el soleamiento formaba parte del proceso del diseño arquitectónico.

En este tiempo, *Le Corbusier* construye la iglesia de *Nôtre Dame du Haut*, considerada como obra paradigma en cuanto al uso y control de la iluminación natural [Figura 61], así como su estudio de las condiciones del lugar definidora de la forma arquitectónica.

Pese a que no se han encontrado registros gráficos, existe el convencimiento de que, así como ya incorporaba el diseño de iluminación natural como argumento para defender la ventana horizontal, cada uno de los elementos de esta iglesia está diseñado para controlar la cantidad y la cualidad de la luz natural que dejarían pasar al interior de la iglesia. El control solar gana importancia en su arquitectura [Figura 62].

En los años 60 la ciencia de la iluminación encamina su desarrollo hacia los sistemas para cuantificar el rendimiento de color de las fuentes de luz, que permitirá establecer el *Índice de Reproducción del Color (IRC)* y la *Temperatura de Color Correlacionada (Tc)* estandarizada por la *CIE*. Este avance permitió desarrollar lámparas fluorescentes con un rendimiento de color mejorado, encareciendo el producto y, por tanto, las instalaciones de iluminación.

*"Gracias al diseño de la casa y de su orientación, cada habitación recibe luz natural en abundancia y hace que la mayoría de las vistas sean hacia el exterior. Los dormitorios están al este, por ejemplo, proporcionando así una vista de la finca. La luz natural inunda el salón, con sus esquinas abiertas y los grandes huecos: un espacio con vistas en todas las direcciones."* -Alison y Peter Smithson [65].

*"la arquitectura es el encuentro de la luz con la forma"* -Le Corbusier.



Figura 61: Interior de la Iglesia Notre Dame du Haut (Ronchamp, Francia), *Le Corbusier* 1950-1955.

*"La arquitectura es un juego magistral, perfecto y admirable de masas que se reúnen bajo la luz. Nuestros ojos están hechos para ver las formas en la luz, la luz y la sombra revelan las formas"* -Le Corbusier [55].

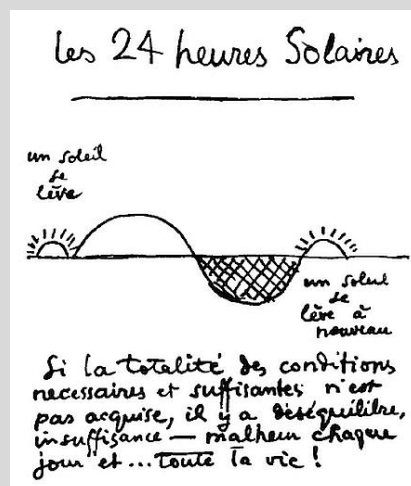


Figura 62: Las 24 horas solares. Esquema sobre la importancia del control solar, *Le Corbusier* 1954.

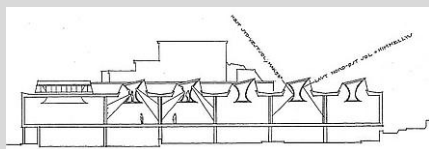


Figura 63: Reflectores asimétricos. Museo Kunsten (Aalborg, Dinamarca), Alvar Aalto 1958-1972.

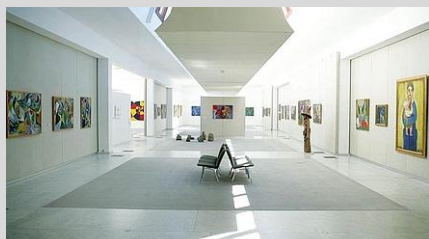


Figura 64: Interior del Museo Kunsten (Aalborg, Dinamarca), Alvar Aalto 1958-1972.

*“Científicamente, resulta imposible asegurar qué clase y qué cantidad de luz es la idealmente apropiada para el ojo humano, pero cuando se trata de construir por ejemplo una sala, la solución debe hallarse con la ayuda de los diferentes elementos que la arquitectura abarca” - Alvar Aalto [66].*



Figura 65: Casa de Té Boa Nova (Leça da Palmeira, Portugal), Álvaro Siza 1958-1962.



Figura 66: Detalle de linterna en Casa de Té Boa Nova (Leça da Palmeira, Portugal), Álvaro Siza 1958-1962.

En el *Concilio Vaticano II* (1962-65) se retoma el discurso social que dio lugar a las dos grandes guerras. El sentir de la nueva sociedad se refleja en la recomendación de adoptar la forma de abanico en las iglesias de nueva construcción, de forma que se democratiza el acceso y la visión del altar. Estas decisiones tomadas desde el seno de la iglesia, determinarán las condiciones de iluminación natural de las mismas, bajo el emblema *“Dios está en todas partes.”*

La luz no se torna esencial sólo en las iglesias, se tiene una mayor conciencia de la necesidad de la iluminación natural en ciertos espacios. Los escritos de *Alvar Aalto* en los últimos años de su carrera lo evidencia: *“La luz es tan importante para un museo de arte como la acústica para una sala de conciertos”*.

*Alvar Aalto* muestra en sus obras una especial sensibilidad hacia la luz natural, siendo ésta la determinante del diseño de algunos elementos arquitectónicos [Figura 63]. Hablando sobre el *Museo Kunsten de Arte Moderno* en Aalborg, *Aalto* expone los medios utilizados para controlar la entrada de luz [66]: *“Ésta es la razón por la que usé una iluminación asimétrica con reflectores redondos debajo de las aberturas de la cubierta. La luz solar que proviene de oeste y del sur es también utilizada por medio de superficies reflectoras en la cubierta que están revestidas, en algunos lugares, con aluminio y baldosas de esmalte. Las altas hayas circundantes hacen de filtro y -junto con las diferentes tonalidades y cambios de color de las estaciones- dan a la iluminación interior una vida propia.”* [Figura 64]

La sensibilidad hacia las condiciones de iluminación natural de los espacios también se muestra ya en las primeras obras de *Álvaro Siza*, para el cual la luz natural juega un importante papel en su obra como también lo juegan el uso de los materiales autóctonos y el trabajo artesano [67].

La geometría de las cubiertas de la *Casa de Té Boa Nova*, la apertura de los huecos y el voladizo del porche muestran una clara intencionalidad para iluminar sus espacios, controlando la entrada de luz directa [Figura 65] [Figura 66].

En el caso de *Louis I. Kahn* la luz natural es un elemento de gran importancia en sus escritos, mostrando un especial interés por el uso de la luz natural en el interior, así como sus repercusiones sobre el espacio y la psicología humana, generando de este modo pensamiento arquitectónico en clave filosófica.

Sin embargo estos escritos parecen expresar sólo la experiencia poética de *Kahn* respecto a la luz natural en la arquitectura. Para *Kahn* la estructura de los espacios es la que permite crear las condiciones de iluminación, de forma que las decisiones que se toman a nivel organizativo, estructural, la apertura de diferentes tipos de huecos afectan al ambiente luminoso de los espacios.

En sus obras el carácter de los espacios y sus relaciones se expresa mediante la estructuración de los mismos con su propia luz, de forma que para él, *“dar luz no es simplemente hacer un agujero en un muro; ni tampoco escoger una viga aquí y allá para enmarcar la cubierta”*.

Pese a estas afirmaciones, parece que su control de la luz natural se debe a continuas experimentaciones, basadas más en intuiciones sobre la forma de aprovechar la luz natural, que en la utilización de los medios científicos disponibles [Figura 67-65].

En este período da la impresión de que la consideración de la iluminación natural y su posible control está ligada a sólo unos pocos arquitectos y a determinadas tipologías de espacios, ya que se generaliza la arquitectura dependiente de unas instalaciones lumínicas y térmicas que satisfagan los requerimientos de confort [1].

En los años previos a 1973, se siguen desarrollando nuevas fuentes de iluminación artificial. Este avance, junto con el desarrollo de las computadoras, dio lugar al desarrollo de los primeros programas informáticos de cálculo de iluminación artificial, como *LIGHT* o *Lumen-I* (1968) [51]. Este desarrollo, impulsado por la presencia de normativa específica de iluminación artificial, claramente deja la luz natural de lado. De hecho, en el estándar americano de iluminación de oficinas (*American National Standard Practice for Office Lighting*, 1972) sólo hay una frase dedicada a la iluminación natural [54]: *“la iluminación natural debería coordinarse en el diseño del sistema de iluminación artificial para asegurar la contribución efectiva de ambos sistemas”*.

Pese a la expansión del método de cálculo de cargas para climatización, hay un creciente interés en desarrollar algoritmos de transferencia de calor más precisos que pudieran ser utilizados con las computadoras para el análisis energético de los edificios. En 1972 se presenta el *método de la ecuación de transferencia*, cuya resolución implica el uso de un programa informático y en el que se introducen las ganancias solares a través de los huecos en el análisis térmico de los edificios [56].



Figura 67: Lucernarios del Centro Británico de Arte. Universidad de Yale (New Haven, Connecticut, USA), Louis I. Kahn 1965-1974.



Figura 68: Estructura base de lucernario aplicada para iluminar y modular la galería de la 4ª planta. Centro Británico de Arte (New Haven, Connecticut, USA), Louis I. Kahn 1965-1974.

*“Sí, no puedo definir realmente un espacio como espacio a menos que tenga luz natural. Y esto se debe a que los ambientes que crean las horas del día y las estaciones del año nos ayudan constantemente a evocar lo que un espacio puede ser si tiene luz natural y lo que no puede ser si no la tiene.”* – Louis I. Kahn.

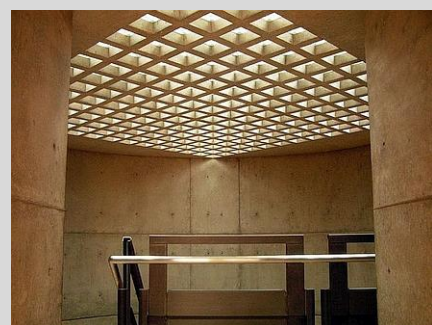


Figura 69: División de la estructura base para iluminar el hueco de escaleras. Centro Británico de Arte (New Haven, Connecticut, USA), Louis I. Kahn 1965-1974.

*“La planta de un edificio debería leerse como una armonía de espacios en la luz. Incluso un espacio que se pretende que quede oscuro debería tener un poco de luz procedente de alguna misteriosa abertura para decirnos lo oscuro que es en realidad. Todo espacio debe ser definido por su estructura y por el carácter de su luz natural.”* – Louis I. Kahn.

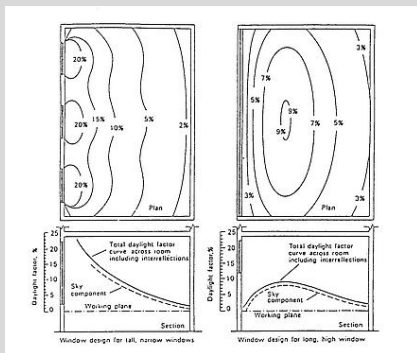


Figura 70: Ejemplo de aplicación del método de diseño gráfico de luz natural (GDDM) [62].

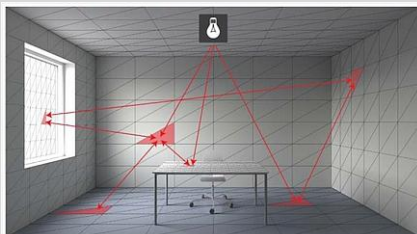


Figura 71: Esquema conceptual del método de la Radiosidad [68].

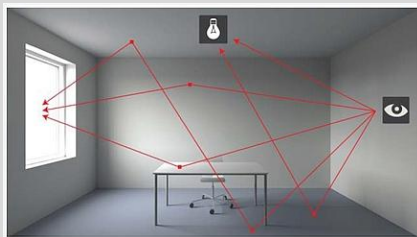


Figura 72: Esquema conceptual del método Backward Raytracing [68].

En cuanto al diseño de las condiciones de iluminación natural, además de las herramientas disponibles, se mantiene la construcción de modelos a escala, especialmente debido a la limitación geométrica de las herramientas de cálculo [3]. Se sabe que *James Stirling* construye un modelo a escala 1:1 para determinar las dimensiones y disposiciones de las aberturas del *Museo Sackler*, aunque finalmente se le añadió un sistema de control computarizado [30].

Con la crisis del petróleo (1973) se cuestiona la dependencia energética, afectando también al ámbito arquitectónico. Se reconsideran los planteamientos heredados para reducir el consumo energético; que darán lugar principalmente a la creación de sistemas y equipos más eficientes y a la investigación sobre el mayor aprovechamiento de las energías renovables.

Cabe señalar que este giro hacia las energías renovables da lugar a la creación de la *Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency -IEA)* (1974) y sus Programas de investigación como el *Programa de Conservación de Energía en los Edificios y en los Sistemas Comunitarios (Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme -ECBCS)* (1977) [69] o el *Programa de Calefacción y Refrigeración Solar (Solar Heating and Cooling Programme -SHC)* (1977), a través del cual se crean tareas de trabajo específicamente centradas en el análisis y diseño de métodos de cálculo para la integración de la calefacción, la refrigeración, la iluminación artificial y la iluminación natural (*task 12*, 1989-1994) [70], el estudio de las estrategias y sistemas de iluminación natural en los edificios (*task 21*, 1995-1999) [71], así como la integración de la iluminación natural con los sistemas de control acorde con el comportamiento de los usuarios (*task 31*, 2001-2005) [72]. También cabe señalar entre sus tareas, las centradas en el desarrollo de herramientas informáticas de análisis energético de los edificios (*task 22*, 1996-2002).

En cuanto a la ciencia de la iluminación natural, se actualizó el concepto y cálculo del deslumbramiento (1972), se desarrolla el *método de diseño gráfico de luz natural (Graphic Daylight Design Method - GDDM)* (1978) para definir más rápido las isolíneas [Figura 70]. También se desarrollan los algoritmos de cálculo computacionales base para los programas de cálculo actuales: *Transferencia de flujo (Flux Transfer)* (1978), *trazado de rayos (Raytracing)* (1979), *radiosidad (Radiosity)* (1982) [Figura 71] y el *trazado inverso de rayos (Backward Raytracing)* (1986) [51] [Figura 72].

Con la acuñación de Arquitectura bioclimática, se rescatan los textos de *Víctor Olgay*, *'Arquitectura y Clima'*, donde se trata la relación entre un edificio y el medio natural que lo rodea. Sin embargo, parece más enfocado a suplir la demanda térmica de los edificios que las cuestiones lumínicas.

En 1978, la *Sociedad Británica de Ingenieros de Iluminación* se une a la *Institución de Ingenieros de Calefacción y Ventilación*, naciendo de este modo el *Colegio Profesional de Ingenieros de Instalaciones de la Edificación (Chartered Institution of Building Services Engineering -CIBSE)*. Los estatutos de la antigua sociedad cambian, excluyendo a todos aquellos no cualificados como ingenieros, perdiendo de este modo una de las fortalezas de la sociedad, que era la mezcla de disciplinas y la amplitud de conocimientos de sus miembros.

En la década de los 80 nacen programas de cálculo específicos para controlar el consumo energético en los edificios, como *TARP*, *BLAST*, *DOE-2*, o *ENERGY*; también nacen programas enfocados a calcular *DF*, como *ADELIN*, *SUPERLITE* o *Lumen Micro*; en 1983, *Navarro* [73] [74] [75] desarrolló la formulación del *Vector Iluminación Natural* [Figura 73], dando lugar a un programa de cálculo de *DF* en base a este concepto.

Paralelamente, *Tregenza* desarrolló en 1983 el concepto de los *Coefficientes de Luz Natural (Daylight Coefficients - DC)* [Figura 74], que dio lugar a la creación del programa *Radiance* (1988) [1] [76], fundamental hoy en día para el cálculo estático o dinámico de la iluminación natural [51]. Sin embargo, estos avances todavía tardarán un tiempo en integrarse en la práctica habitual del equipo de trabajo que rodea a la arquitectura, más centrada en los aspectos formales.

La complejidad de los requisitos de los edificios requiere de todo un equipo de especialistas que proporcionen soporte técnico para su ejecución. Esto contribuye también a la segregación entre la forma arquitectónica y la disciplina de la iluminación natural, llevando a la construcción de entornos cuyas condiciones de iluminación son controladas, es decir, «cajas negras» desvinculadas de su entorno cuya iluminación es exclusivamente artificial [1].

Sin embargo, existe otra postura en el que las referencias al entorno en arquitectura son indispensables. Así es como *Norman Foster* expone su misión, “*crear una estructura sensible a la cultura y el clima de cada localización*”.

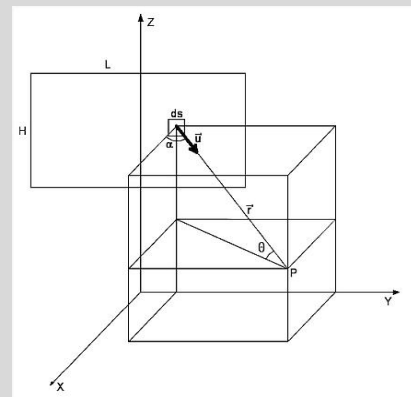


Figura 73: Concepto de *Vector Iluminación Natural* [73].

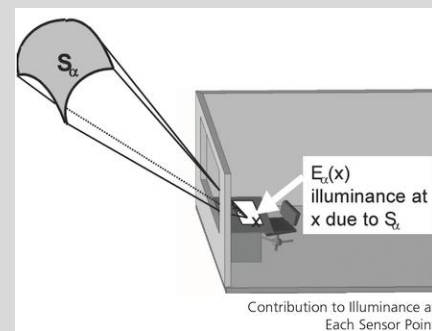


Figura 74: Concepto de *Coefficientes de Luz Natural* [77].

*“La luz sólo se convierte en algo maravilloso cuando tiene como fondo la más profunda oscuridad. Los cambios de iluminación a lo largo del día reflejan, una luz mayor, la relación del hombre con la naturaleza, constituyéndose en la máxima abstracción de ésta, al tiempo que desempeña una función purificadora con respecto a la arquitectura”.* - Tadao Ando [Figura 75].



Figura 75: Iglesia de la Luz (Osaka, Japón), *Tadao Ando* 1989.



Figura 76: Colección Menil (Houston, USA), Renzo Piano 1982-1986 [78].

*“La luz además de intensidad es vibración, capaz de volver áspero un material suave o de dotar de tres dimensiones a una superficie plana.”* – Renzo Piano.



Figura 77: Galería de Arte Goetz (Berlín, Alemania), Herzog & de Meuron 1986-1987.

*“la luz cambia la escala de las cosas, y la arquitectura es una cuestión de escala.”* – Jacques Herzog.



Figura 78: Instituto del Mundo Árabe (París, Francia), Jean Nouvel 1981-1987 [79].

*“Quiero que los edificios que diseño atrapen la luz y el entorno. Es un ejercicio sobre la conciencia de existir en un momento determinado.”* – Jean Nouvel.

La relación con el entorno suele establecerse en primer lugar con la admisión de luz natural, la relación visual y temporal con el exterior. Bajo esta línea de trabajo se encuentran arquitectos como *Renzo Piano*, *Tadao Ando*, *Álvaro Siza*, *Norman Foster*, *Herzog & de Meuron* o *Peter Zumthor*, entre muchos otros.

En *Renzo Piano* la luz y la materialidad se convierten en sus instrumentos más importantes, siendo la contención del espacio arquitectónico resultado de la conjunción de las mismas.

La premisa del proyecto para la *Colección Menil* era que las obras de arte fueran vistas bajo iluminación natural, con sus cambios diarios y estacionales. Para ello se realizó un análisis del comportamiento de la luz bajo varios ángulos, las múltiples refracciones y las opciones para filtrar la radiación ultravioleta. Para controlar y modular la luz natural y artificial se realizaron varios experimentos con diferentes materiales. Como resultado se obtuvo la creación de un elemento estructural curvo, conocido como «hoja». La disposición sucesiva de estas hojas forman la cara interna de la cubierta cuya función principal es la de filtrar la luz natural [78] [Figura 76].

Cuando los arquitectos suizos *Jacques Herzog* y *Pierre de Meuron* entraron en la escena arquitectónica, a principios de los 80, la arquitectura se hallaba en pleno proceso de cambio causado por el cansancio de las formas y soluciones postmodernas.

Pese a que se nutren de las condiciones topográficas y culturales para la elaboración de sus proyectos, éstos se expresan mediante una imagen formal resultado de la lógica material y constructiva, dando lugar a edificios con una cuidada imagen exterior que forman el telón de fondo de la escena urbana. Esto ha llevado a que se les clasifique como «epidérmicos».

Sin embargo, parte de las funciones de esta «piel» es la de filtrar las condiciones exteriores, siendo la luz natural una de ellas, como es el caso de la *galería de arte Goetz*, donde la luz natural juega un papel fundamental [Figura 77].

La primera vez que *Jean Nouvel* empezó a considerar la cuestión de la iluminación natural fue con el proyecto del *Instituto del Mundo Árabe* [Figura 78]. Sus primeras intuiciones sobre el control de la luz natural se reflejan en la fachada Sur [79], *“que consiste en su totalidad en una membrana similar a las de las cámaras fotográficas, y reaparece en el ámbito de las escaleras, en la desaparición de los contornos, las superimposiciones, en reverberaciones y reflexiones y en las sombras”*.



Para *Nouvel* una vez que un arquitecto entiende el comportamiento de la luz natural y cómo afecta a la percepción de los espacios, su vocabulario arquitectónico y su forma de proyectar se transforma.

*Peter Zumthor* se refiere a la «atmósfera» para definir la realidad arquitectónica y su conexión con la sensibilidad emocional que hace que quien la mire la perciba inmediatamente. La atmósfera establece la conexión sentimental del individuo con su entorno [80].

Los nueve puntos que componen estas atmósferas no son más que diferentes vínculos entre los edificios y su entorno, siendo la materialidad de la arquitectura el medio con el que se crea esta relación.

Uno de estos vínculos es precisamente la luz natural, a la que se refiere como un elemento clave en la arquitectura, capaz de matizar cada uno de los ambientes interiores mediante su naturaleza cambiante. La luz natural es la que le da función a un lugar [Figura 79].

La luz natural también es un elemento clave en la concepción de la arquitectura de *Alberto Campo Baeza*, que se expresa a través de sus obras y de sus múltiples escritos.

Para *Campo Baeza*, la arquitectura es luz que atraviesa un espacio. Ésta no tiene porqué ser necesariamente dramática, sino que en función de cómo entra la luz en el espacio, éste adquiere unas características u otras. *“La luz natural debe dosificarse como la sal en una receta de cocina.”*

Su carrera arquitectónica muestra la evolución de su experimentación con la luz natural. Él mismo marca como hitos de luz a las *casas Turégano, Gaspar y Asencio*. En la *casa Turégano* conecta dos dobles espacios opuestos mediante el uso de una luz diagonal. Las *casas Gaspar y Guerrero*, íntimamente relacionadas, muestran la incorporación de la luz reflejada en el ámbito doméstico. En la *casa Asencio*, derivada de la *casa Turégano*, incorpora nuevos elementos, como la presencia de lucernarios.

Muestra también un tratamiento distinto de la luz natural en el ámbito doméstico y en las obras singulares, como la *Caja de Granada* [81]: *“El patio central interior, verdadero «impluvium de luz», recoge la luz sólida del Sol a través de los lucernarios y, reflejándola en los paramentos de alabastro, aumenta la iluminación de las oficinas abiertas. [...] se trata de una caja de hormigón y piedra que atrapa la luz del Sol en su interior para servir a las funciones que se desarrollan dentro de ese «impluvium de luz»* [Figura 80].



Figura 79: Terme di Vals (Graubunden Canton, Suiza), Peter Zumthor 1993-1996.

*“debo confesar que la luz natural, la luz sobre las cosas, me emociona a veces de tal manera que hasta creo percibir algo espiritual.”* -Peter Zumthor.

*“Una de mis ideas favoritas es ésta: diseñar el edificio como una masa de pura oscuridad y entonces, después de todo, ponerla en la luz como si estuvieras sacando la oscuridad, como si la luz fuera una nueva masa filtrándose dentro.”* -Peter Zumthor.



Figura 80: Interior del edificio de Caja Granada (Granada, España), A. Campo Baeza 2001 [81].

*“Si es la luz, con o teoría corpuscular, algo concreto, preciso, continuo, matérico: Materia medible y cuantificable donde las haya, como muy bien saben los físicos y parecen ignorar los arquitectos.”* - Alberto Campo Baeza [82].

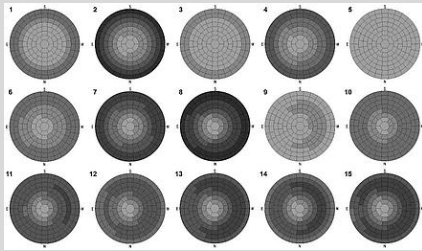


Figura 81: Distribución de luminancias de los 15 modelos de cielo contenidos en el Modelo de Cielo General Estándar CIE [83].

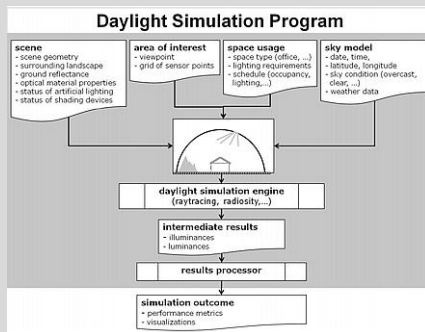


Figura 82: Esquema conceptual de los programas de Simulación Dinámica de Iluminación Natural, como DAYSIM [84].

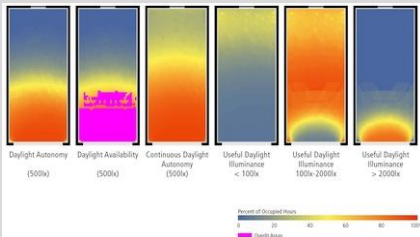


Figura 83: Indicadores dinámicos de Iluminación Natural. Distribución sobre el plano de trabajo [85].

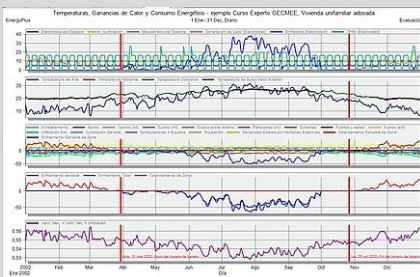


Figura 84: Expresión gráfica del análisis térmico de un edificio. Salida de datos de DesignBuilder [86].

Como podemos observar, los arquitectos que hablan de la luz suelen hacerlo en términos más poéticos que técnicos, en gran parte debido a la separación entre la disciplina y fundamentos físicos de la iluminación natural y la arquitectura, fomentada, entre otros, por la ausencia de requisitos normativos.

De hecho, es raro encontrar aportaciones al conocimiento científico analítico de la iluminación natural en arquitectura que provengan de arquitectos, y cuando así sucede, existe una brecha entre el conocimiento científico y la formación y la práctica profesional del arquitecto. Sin embargo, la presencia de normas de edificación en materia energética, sí ha resultado en el conocimiento de los fundamentos físicos de la transferencia de calor en los edificios por parte de los arquitectos y su incorporación al proceso proyectual.

La disciplina de la iluminación natural, en los últimos 20 años, ha seguido avanzando para pasar de disponer del *DF* a considerar la variabilidad de la luz natural, obteniendo una mayor aproximación con la realidad.

Como hitos en esta evolución de la disciplina cabe señalar la definición del *Modelo de Cielo de Perez (All-weather Sky model)* (1993) [87] [Figura 81], que ha dado lugar, junto a los *Coefficientes de Luz Natural*, a las *Simulaciones dinámicas de luz natural (Daylight Dynamic Simulations -DDS)* mediante la creación del programa *DAYSIM* (2000) [88] [Figura 82], y con la definición de nuevos indicadores como la *Autonomía de Luz Natural (Daylight Autonomy -DA)* (2005) y la *Iluminancia Natural Útil (Useful Daylight Illuminance -UDI)* (2006) [13], entre otros [51] [Figura 83].

En el ámbito de análisis térmico, se han reemplazado los métodos de cálculo por el *Método del Balance Térmico (Heat Balance Method -HBM)* (1997) y el *Método de las Series Radiantes Temporales (Radiant Time Series Method -RTSM)* (1997), aportando mayor precisión en el cálculo de la radiación solar que se introduce a través de los huecos de la envolvente del edificio. Asimismo, se ha desarrollado un nuevo motor de cálculo, *EnergyPlus* (1998) [89], dando lugar a un gran panorama de herramientas disponibles en la actualidad.

Por lo tanto, actualmente se cuenta con las bases científicas, incorporadas a las herramientas de cálculo de iluminación natural y de análisis energético [Figura 84], para conocer y predecir el comportamiento lumínico y térmico de los espacios arquitectónicos, ya sea en fase de diseño como en las intervenciones sobre los edificios existentes.

También es cierto que, debido a la falta de formación en estas materias, se tiende a utilizar las herramientas como un fin en vez de un medio de análisis, eliminando de esta forma, la capacidad de crear conocimiento sobre estrategias de actuación.

Actualmente, las presiones del panorama actual para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero han hecho que no sólo se tengan en cuenta las condiciones térmicas de los elementos constructivos del edificio para controlar la transferencia de calor en condiciones de invierno, sino que se empieza a prestar especial atención a la cantidad de calor que entra en los espacios a través de sus huecos (*radiación solar directa*) y, de forma secundaria, las condiciones de iluminación natural de dichos espacios para reducir el consumo energético de los sistemas de iluminación artificial.

Actualmente estamos en un periodo en el que, en términos de sostenibilidad, se trata de recuperar y actualizar esa tradición constructiva que se adaptaba a las condiciones climáticas locales para obtener las mejores condiciones de confort posibles. Este paradigma actual también se ve reflejado en las preocupaciones de la Arquitectura y en la actitud de los arquitectos respecto a las condiciones medioambientales de los espacios interiores expresado a través de su pensamiento arquitectónico.

*“Los arquitectos piensan mucho en la luz. Porque no se trata sólo de la luz: también hay que crear las condiciones para el confort y pensar en el problema del consumo de energía. Cuando diseñamos, tenemos que crear las mejores condiciones. En las casas, la variación de luz es una necesidad. Es preciso entender la relación con el exterior, la protección del exterior, disponer de espacios abiertos amplios y espacios casi sumergidos en la oscuridad, que resulten relajantes y confortables a la mirada. Cosas que en el pasado tuvieron mucha importancia, pero que en la arquitectura moderna hasta cierto punto la han perdido temporalmente...” – Álvaro Siza (2010).*

*“Para mí, la luz significa la visibilidad de la presencia de la Arquitectura. Esta se define según el modo como se ha iluminado. La iluminación es mucho más que algo funcional. En este sentido, creo que en el siglo XX se hizo mucho daño a la iluminación en general, porque fomentó la sobre iluminación, incluso se han establecido normativas que nos obligan a respetar un cierto mínimo de luz, unos máximos... Para mí, la luz sólo existe respecto a la sombra, es algo que evoca una sensación, una emoción. Así que no me gusta nada la luz constante o demasiado fuerte. Aunque, en algunos momentos, una luz cegadora también puede impactar y tener su aquel.” – Jean Nouvel (2013).*

*“A un no arquitecto hay una cosa que le mosquea mucho, y es cuando digo que la luz es un material. Y no lo digo yo, un tal Newton dijo que era corpuscular, así que sí, es un material. Y los arquitectos tendríamos que utilizarla como material. Y digo tendríamos porque muchos no lo hacen. De hecho, la luz es el material más lujoso que hay, el material más lujoso con el que trabajamos los arquitectos; pero como es gratis, no lo valoramos.” – Alberto Campo Baeza (2014).*



## 2.2 Modelos, Indicadores y Métodos

A partir de la publicación del libro de *Isaac Newton 'Opticks'* [40] se han desarrollado muchos estudios sobre la luz: su naturaleza, métodos de cálculo y medida. Se han formulado modelos teóricos y éstos han evolucionado hasta el día de hoy a medida que se ha adquirido un conocimiento más profundo de los diferentes aspectos involucrados [21].

Se puede decir que el nacimiento de las servidumbres de luz o los requerimientos de iluminación natural mínimos en determinadas tipologías de edificios, especialmente de escuelas, supone una cierta inquietud hacia los aspectos más científicos de la iluminación natural, promoviendo el desarrollo de herramientas específicas para su cuantificación [21]. Sin embargo, no fue hasta final del siglo XIX cuando se creó el primer luxómetro o se formuló por primera vez el concepto del *Factor de Iluminación Natural (FIN, Daylight Factor -DF)*, una métrica que se mantiene en vigor en la actualidad [51].

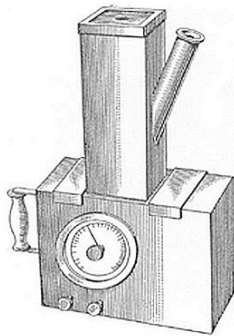


Figura 85: Luxómetro de Trotter (1911) [47].

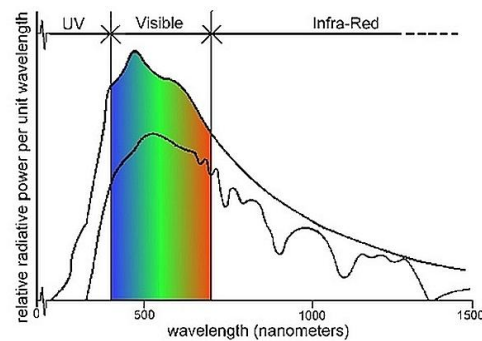


Figura 86: Espectro electromagnético de la radiación solar.

Sin embargo, no debemos olvidar que lo que percibe el ojo humano es sólo una faceta de la luz; hay que considerar que, en su modalidad de onda electromagnética, lo que percibimos es sólo la radiación solar emitida en el rango visible del espectro electromagnético, pero una parte importante de dicha radiación se produce también en el rango infrarrojo, y otra parte en el rango ultravioleta [21]. Además, la luz no sólo se comporta como onda sino también como partícula, estudiada esta faceta mediante la mecánica cuántica.

Los estudios sobre *la naturaleza de la luz* mostraron su complejidad dando lugar al desarrollo de la óptica: una rama de la física que estudia los fenómenos asociados con el rango visible de la luz y sus bandas adyacentes, dando lugar a la óptica geométrica, la óptica física y la óptica cuántica<sup>1</sup>, en función del aspecto de la naturaleza de la luz estudiado. Además, la necesidad de medir la radiación electromagnética dio lugar al desarrollo de la radiometría y la fotometría<sup>2</sup> [21].

En el campo de la arquitectura, y en concreto del acondicionamiento ambiental, la atención se centra en la radiación en la región infrarroja para estudiar las cuestiones térmicas y en la región

<sup>1</sup> La óptica geométrica basa su estudio en el concepto del rayo luminoso; la óptica física se introduce en la naturaleza de la luz, como onda electromagnética; y la óptica cuántica atiende a la interacción de la luz con la materia a nivel atómico.

<sup>2</sup> La radiometría es la ciencia que se ocupa del estudio de la medida de la radiación electromagnética total. Su campo abarca todas las longitudes de onda del espectro electromagnético (longitudes de onda de entre 0,01 y 1000 micrómetros). La fotometría se encarga, sin embargo, sólo del estudio de la región visible de la radiación electromagnética, la que puede percibir el ojo humano, aplicando la curva de sensibilidad espectral del ojo humano, normalizada por la CIE.

visible para estudiar las cuestiones lumínicas. Frente a la complejidad de la naturaleza de la luz, estos dos aspectos serán objeto de estudio en este trabajo.

En este ámbito, se considera iluminación natural el acto de iluminar el interior de un edificio con luz procedente del Sol y de la bóveda celeste [1], siendo sus objetivos principales los de proporcionar las condiciones de iluminación suficientes para el desarrollo de las tareas visuales, así como unas condiciones de confort visual de los ocupantes y reducir el consumo de energía total del edificio [21].

La investigación básica de la iluminación natural se aborda tradicionalmente desde tres campos distintos: las fuentes de iluminación natural (el Sol y el cielo), desarrollada por investigadores como *P. Moon y D. E. Spencer* [62], *R. Kittler y S. Darula* [21] [90], o, *R. Perez* [91], entre otros; la visión y percepción humana, a través de *G. Newsham* [92], *L. Heschong* [93] o *J. Veitch* [8], entre otros; y los métodos e indicadores para cuantificar la luz, como exponen *C. Reinhart, J. Mardaljevic* o *Z. Rogers* [13] entre otros; en base a estos campos de conocimiento surgen los proyectos de investigación aplicada sobre estrategias de iluminación natural o el comportamiento humano frente a la luz natural.

Las fuentes de iluminación natural son elementos clave para la obtención de los indicadores físicos, por lo que se incluyen en la revisión de la literatura. Las condiciones de la visión humana, y de salubridad [94], pese a no tratarse en este trabajo de investigación, son la base sobre la cual se fundamentan los requerimientos lumínicos de un espacio, y como tales se hace constancia en los estudios científicos documentados.

Los métodos de cálculo y los indicadores de iluminación natural, integrados con los indicadores térmicos, forman parte del núcleo central de esta tesis doctoral. La investigación básica sobre estos aspectos se aplica a un modelo concreto sobre el que se realiza un análisis comparativo del efecto lumínico-térmico de las diferentes variables que intervienen en las condiciones de iluminación natural de los espacios arquitectónicos.

La caracterización las fuentes de iluminación natural, desde un punto de vista lumínico, dio lugar a la formulación teórica de *modelos de cielo*, principalmente durante la primera mitad del siglo XX, y al desarrollo de diversos estudios experimentales sobre la *eficacia luminosa* de la radiación solar, la *disponibilidad de luz natural* o la luminosidad del cielo, entre otros [21], siendo de gran relevancia la definición del modelo teórico de *Cielo Nublado Estándar CIE (CIE Standard Overcast Sky)* de *Moon & Spencer* [62] y el modelo de *Cielo General Estándar CIE (CIE Standard General Sky)* de *Perez*, que contiene 15 tipos de cielo [87].

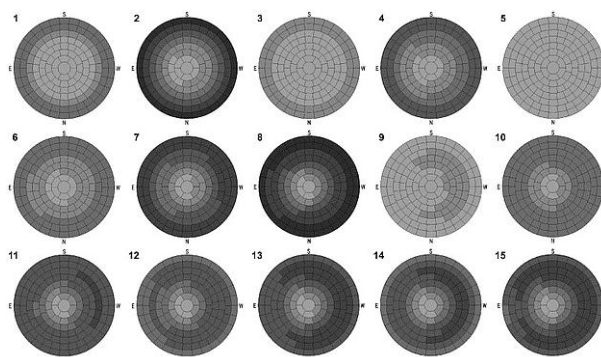


Figura 87: Distribución de luminancias de los 15 modelos contenidos en el *Cielo General Estándar CIE* [83].

Durante la primera mitad del siglo XX, el establecimiento del Factor de Iluminación Natural, como concepto y medida de la cantidad de luz natural que entra en un espacio, y del modelo de *Cielo Nublado Estándar CIE* dieron lugar al desarrollo de diversos métodos de cálculo, gráficos y

analíticos, que se vieron complementados con el desarrollo de estudios de modelos a escala, tanto de cielo como del espacio a estudiar, para el análisis de las condiciones de iluminación natural [51]. Como resumen y tratado de los modelos y métodos de cálculo de la iluminación natural, aparece en 1966, el texto *'Daylighting'* [62], siendo un documento clave de obligada lectura para el entendimiento de esta disciplina.

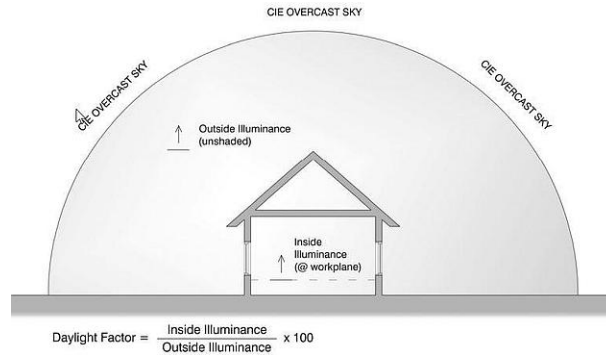


Figura 88: Concepto de *Factor de Iluminación Natural*.

Como el *Factor de Iluminación Natural* sólo aporta información sobre la iluminación difusa, normalmente se complementa con el análisis de las condiciones de asoleo, que aporta información sobre la incidencia directa del Sol expresada en horas de soleamiento. Para la determinación de las mismas ha sido fundamental el conocimiento de la geometría solar y el desarrollo de herramientas gráficas, como las cartas solares, de forma que, desde la primera mitad del siglo XX el estudio de las condiciones de iluminación natural de un espacio se componía del análisis de la distribución de valores *DF* complementado con el análisis gráfico de las horas de soleamiento [95].

Sin embargo, desde hace aproximadamente una década se ha comenzado con la Modelación climática de la Luz Natural (*Climate Based Daylight Modelling -CBDM*) [96] gracias al desarrollo de los *Coefficientes de Luz Natural (Daylight Coefficients -DC)* de Tregenza [77] en combinación con el modelo de *Cielo General Estándar CIE*. Con esta técnica se obtienen valores de iluminación global (difusa + directa) obtenidos según la etapa temporal de cálculo (horaria o sub-horaria) en función de las condiciones climáticas locales, que vienen recogidas en los archivos climáticos estandarizados.

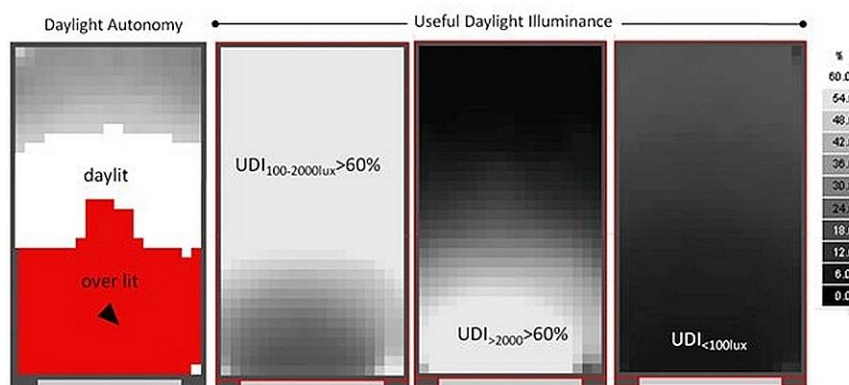


Figura 89: Representación de los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural* [17].

La gran cantidad de valores de iluminación que recibe cada punto (4380 valores horarios diurnos de iluminación natural a lo largo del año) ha dado lugar al establecimiento de nuevos indicadores, conocidos como *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (Dynamic Daylight Metrics -DDMs)*, que permiten analizar estos datos por cada punto en base a un tratamiento estadístico de los mismos. Estos indicadores arrojan un único valor representativo por cada punto,

permitiendo representaciones gráficas de las condiciones anuales de iluminación natural en el plano que contiene al conjunto de puntos estudiado [13].

La radiación solar directa que entra en un espacio a través de sus huecos no sólo se estudia de forma gráfica para conocer su incidencia lumínica expresada en forma de horas de soleamiento, sino que, además, representa una carga térmica, de especial importancia en las regiones cálidas, que influye en las condiciones de confort interior. La insolación, *radiación solar térmica* que incide sobre una superficie, tiene su ámbito de estudio en la disciplina del acondicionamiento térmico. Esta radiación puede cuantificarse una vez establecidas las ecuaciones de los diferentes mecanismos de transferencia de calor entre los cuerpos. Aunque las horas de soleamiento y la insolación contemplan dos aspectos complementarios de un mismo fenómeno, es bastante inusual encontrar estudios donde se integren ambas vertientes, siendo lo habitual el estudio por separado de ambos aspectos.

Con el desarrollo de los métodos computacionales, los algoritmos de cálculo que permiten resolver las ecuaciones que describen los diferentes fenómenos físicos se complejizaron, dando lugar a nuevos *métodos de cálculo y programas de simulación* [97].

En el ámbito lumínico, la creación de los algoritmos de *trazado de rayos (Raytracing)*, de *radiosidad (Radiosity)* y, especialmente, del *trazado inverso de rayos (Backward Raytracing)* es clave para la creación de programas informáticos de cálculo de iluminación, *Radiance*<sup>3</sup> [76] entre ellos. En el ámbito térmico, destacan el *método del balance térmico (Heat Balance Method -HBM)* y el *método de las series temporales radiantes (Radiant Times Series Method -RTSM)*. Si bien *Radiance* es el motor de cálculo internacionalmente reconocido para el cálculo de iluminación natural, *EnergyPlus* es su análogo en el cálculo de transferencias térmicas [89].

Con la gran presencia de herramientas de simulación, cada vez es más común encontrar programas que permitan el cálculo bajo el mismo entorno y con el mismo modelo informático de las condiciones térmicas y lumínicas de un espacio, entre otros. Sin embargo, cabe preguntarse, precisamente por la gran cantidad y variedad de programas [98], sobre la precisión de los resultados que ofrecen, no sólo estas herramientas integradoras, sino los programas de cálculo específicos, para lo cual se han establecido sistemas y procedimientos de comparación y validación de resultados de simulación: los *CIE Test Cases* [99] para determinar la validez de los resultados de los programas de cálculo de iluminación, y el *método BESTEST* [100] para comprobar la precisión de los programas de simulación energética.

---

<sup>3</sup>*Radiance* es el principal motor de cálculo a nivel internacional para el cálculo de las condiciones de iluminación de un espacio. Desde su creación, ha sido actualizado a medida que avanzaba el conocimiento de los fundamentos físicos y sus demostraciones matemáticas, mediante la aportación científica de los expertos en las diferentes materias involucradas en el cálculo del comportamiento de la luz desde su emisor hasta la disipación de su energía [76] [108].



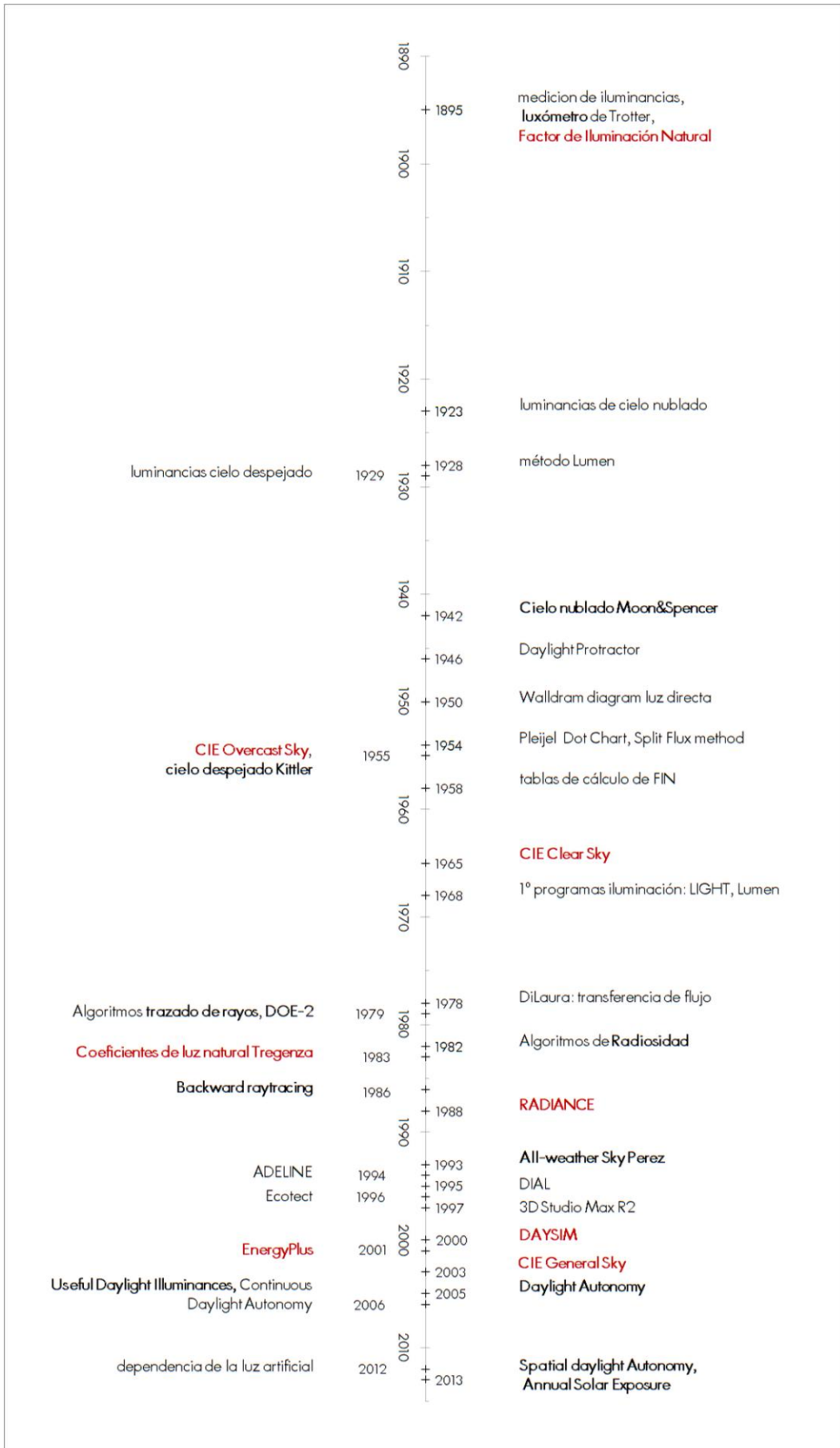


Figura 90: Desarrollo temporal de los modelos, métodos e indicadores.



### 2.2.1 Radiación solar: Iluminación Natural e Insolación

El Sol, fuente primaria de la luz natural, irradia energía de aproximadamente  $4 \times 10^{23}$  kW en todas las direcciones, que es transportada en forma de ondas electromagnéticas en una amplia gama de *longitudes de onda* ( $\lambda$ ) que se desplazan en el vacío a una velocidad de 300.000 km/s [69].

La radiación solar incidente por unidad de tiempo y unidad de área sobre una superficie normal a los rayos solares en el límite exterior de la atmósfera terrestre (radiación solar extraterrestres) cuando la Tierra se encuentra a su distancia media del Sol es lo que se conoce como *Constante Solar* y tiene un valor aproximado de  $1367 \text{ W/m}^2$ , con un error probable de  $-2\%$ , siendo 127,5 klux la constante de iluminación solar. El valor de la *Constante Solar*, además, cambia a lo largo del año debido a la variación de la distancia entre el Sol y la Tierra [21] [69] [101] [102].

La distribución espectral de la radiación solar extraterrestre, propuesta por el *WRC (World Radiation Center)*, es similar a la distribución espectral de un cuerpo negro a una temperatura de 5777 K. La energía solar se distribuye en el *espectro electromagnético* [Figura 92] a razón de aproximadamente un 7% en *longitudes de onda* menores de 380 nm (región ultravioleta), un 47% en *longitudes de onda* comprendidas entre 380 nm y 780 nm (región visible), emisión que puede ser captada por el ojo humano, y un 46% en longitudes por encima de 780 nm (región infrarroja) [101] [103].

La porción de radiación solar emitida en el *rango visible* es lo que se considera luz natural, siendo objeto de estudio de esta tesis, así como también es objeto de estudio la parte de la radiación solar emitida en el *rango infrarrojo* cercano, que da lugar a la insolación térmica.

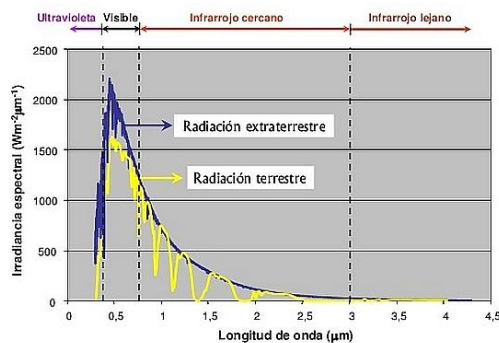


Figura 91: Distribución espectral de la radiación solar extraterrestre y al nivel del mar (curva inferior).

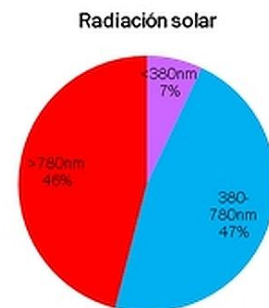


Figura 92: Distribución porcentual de la radiación solar en las regiones del espectro electromagnético

Parte de la radiación solar que atraviesa la atmósfera es dispersada por las moléculas de los gases de la atmósfera, principalmente por las partículas de  $\text{O}_3$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , y de las partículas en suspensión. Parte de esta radiación interceptada por la atmósfera llega a la superficie terrestre en forma de *radiación solar difusa*, mientras que la parte de la radiación solar que llega directamente a la superficie de la Tierra forma la *radiación solar directa* [69] [101].

La *intensidad de la radiación solar o irradiancia*, por tanto, se ve afectada por su recorrido a través de la atmósfera y su ángulo de incidencia, expresado como *Masa de Aire (Air Mass -AM)*, que es la relación entre el recorrido óptico de un rayo solar y el correspondiente a la normal a la superficie terrestre, y, además, por las condiciones climáticas que determinan la nubosidad de la bóveda celeste [21] [102].

La *radiación solar global* que finalmente recibe una superficie en la superficie terrestre se compone de la suma de la radiación solar directa, la radiación solar difusa y de una cantidad de

radiación extra, llamada *albedo*, que representa la radiación solar reflejada por el suelo [21]. Debido a estos factores, la *irradiancia* que llega a la superficie de la tierra no suele superar los 1000 W/m<sup>2</sup> sobre una superficie perpendicular a la trayectoria de los rayos en un día despejado, siendo de aproximadamente 100 W/m<sup>2</sup> en días completamente nublados [102] [104].



Figura 93: Ejemplos de variación de *iluminancia* en la bóveda celeste bajo diferentes condiciones de cielo [105].

La radiación que incide en un cuerpo, en parte es absorbida, caracterizándose por la *absortividad* ( $\alpha$ ), otra parte se transmite a través del cuerpo, caracterizándose por la *transmisividad* ( $\zeta$ ) y una parte se refleja, caracterizándose por su *reflectividad o reflectancia* ( $\rho$ ). Esta terna de valores, cuya suma es igual a 1, es diferente en función de la longitud de onda incidente y permite la caracterización de los cuerpos [21].

$$\alpha(\lambda_i) + \beta(\lambda_i) + \zeta(\lambda_i) = 1$$

Ecuación 1: Absortividad, reflectividad y transmisividad.

Es decir, cada cuerpo absorbe, transmite y refleja cada *longitud de onda* del espectro electromagnético de forma diferenciada. Además, estos valores también varían en intensidad en función del ángulo de incidencia de dicha radiación. El comportamiento de los materiales frente a la radiación es el campo de investigación de la caracterización de materiales, que se complementa con otro coeficiente conocido como *emisividad* ( $\epsilon$ ) que es la relación entre la radiación emitida por una superficie real y la emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura.

Tanto la *emisividad* como la *absortividad* dependen de la *longitud de onda* incidente, pero en el caso de la edificación es razonable asumir que estos coeficientes son independientes de la *longitud de onda*, caracterizando lo que se conoce como una superficie gris, donde la *emisividad* y la *absortancia* son iguales ( $\alpha = \epsilon$ ).

Sin embargo, aunque se asume que estos coeficientes son independientes de la *longitud de onda* incidente, normalmente se distinguen dos ternas de valores que representan el comportamiento de un cuerpo frente a las *longitudes de onda* del *rango visible* (propiedades visibles u ópticas) y frente a las *longitudes de onda* del *rango infrarrojo* (propiedades térmicas). Estas dos ternas determinan cómo se comporta un cuerpo frente a la luz y el calor [21] [69].

Los efectos de ambos rangos del *espectro electromagnético* sobre los edificios comprenden áreas de investigación diferenciadas aunque el origen de la radiación sea la misma. Del mismo modo, los modelos que caracterizan la fuente de la radiación se describen según diferentes ecuaciones matemáticas, basados en determinados aspectos físicos, así como las unidades de medida, los métodos y motores de cálculo y las hipótesis de partida también son diferentes.

Siendo los huecos de un edificio, caracterizados por sus propiedades ópticas y sus propiedades térmicas, el medio a través del cual se introduce la radiación solar en el edificio, se exponen a continuación los conceptos físicos, indicadores y métodos de cálculo que describen la cantidad de radiación solar, visible o térmica, que pasa a su través.

### 2.2.2 Radiación solar visible a través de los huecos

El estudio científico de la iluminación natural en la arquitectura es bastante reciente; su comienzo puede fijarse a finales del siglo XIX, cuando empiezan a desarrollarse las primeras herramientas para medir la cantidad de luz que llega a una superficie y arrancan las primeras campañas de medición de los *niveles de iluminación o iluminancia (Ev)* en exteriores. Entre los diversos tipos de fotómetros que se inventaron, destaca el fotómetro de *Trotter* y el de *Weber* por ser de los primeros en utilizarse para la medición de luz natural [21] [51].

La luz natural que recibe un punto de un espacio interior se debe a la luz directa proveniente del Sol, a la luz difusa proveniente de la bóveda celeste, a la luz reflejada en las superficies exteriores (como el suelo u otros edificios) y a la luz reflejada en las superficies interiores del espacio antes de alcanzar dicho punto [1] [106] [Figura 94], todos estos componentes filtrados según las características ópticas del material utilizado en los huecos. De forma muy resumida, en la iluminación natural, el Sol y la bóveda celeste son la fuente emisora de luz natural que tiene que atravesar un medio delimitado por superficies que absorben, filtran y difunden la luz que inciden sobre ellas antes de llegar al punto de estudio, que es el receptor final [21].

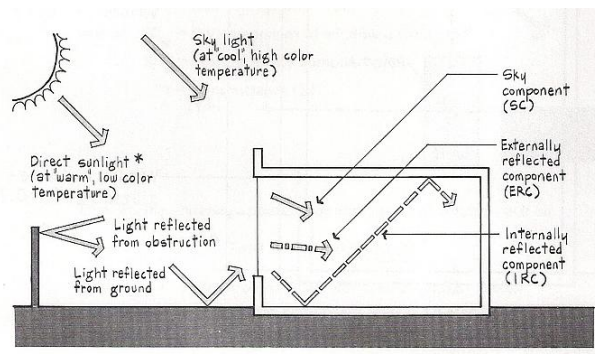


Figura 94: Componentes de la iluminación natural [95].

La determinación de la aportación de cada uno de estos componentes ha llevado al desarrollo de diferentes modelos de cielo (para considerar la *distribución de luminancias* de la bóveda celeste, con o sin la presencia del Sol) y de diferentes indicadores de iluminación natural, para una situación determinada o considerando la variabilidad anual, así como diversos métodos de cálculo, tanto analíticos como gráficos, de resolución manual o computacional, específicos o integrados con otros métodos de cálculo, dando lugar a un amplio historial de herramientas [21].

Tras el fuerte desarrollo de los métodos computacionales en las dos últimas décadas del siglo XX, las simulaciones de iluminación natural han desbancado a los métodos manuales de cálculo [107] [108]. Del mismo modo, los algoritmos computacionales han permitido la definición de nuevos indicadores de iluminación natural que aportan una mayor precisión en la predicción de las condiciones lumínicas de un espacio en un determinado periodo.

La necesidad de conocer la cantidad de luz que se tiene en un espacio llevó, como se ha comentado anteriormente, a la invención de dispositivos que permitieran medir la cantidad de luz, pero también, de forma coetánea, al desarrollo de indicadores absolutos y relativos de iluminación, dando paso al desarrollo de diferentes líneas de investigación que han evolucionado paralelamente pero también interrelacionadas.

El desarrollo de los indicadores está fuertemente vinculado con la definición de los modelos de cielo, que caracterizan la fuente de iluminación natural, así como con los métodos de cálculo que

hacen viable la obtención de valores, así como su tratamiento estadístico y su representación gráfica.

Con la aparición del primer luxómetro (1885) se realizaron las primeras mediciones cuantitativas de iluminación natural [21] y se formuló por primera vez el concepto de *Factor de Iluminación Natural (FIN, Daylight Factor -DF)* como la relación entre la luz interior y la luz exterior.

La primera campaña de medidas de la *distribución de luminancias* de la bóveda celeste llevó a la primera formulación matemática de la *distribución de luminancias* de la bóveda celeste bajo condiciones de un cielo perfectamente nublado (1921-23), con simetría cilíndrica y, por tanto, con la misma *luminancia (L)* en todas las orientaciones. Más tarde se formularía matemáticamente la *distribución de luminancias* de un cielo despejado, considerando el esparcimiento de *Rayleigh* (1929), esto supondría la obtención de modelos de cielo para las condiciones más extremas de cielo: completamente nublado y completamente despejado [21] [51].

Paralelamente a la formulación de estos modelos de cielo aparecieron métodos de cálculo, como los *diagramas de Waldram* para calcular gráficamente la componente de cielo (1923), o el *método Lumen* para calcular analíticamente el *DF* (1928) [21]. Sin embargo, no fue hasta 1942 cuando *P. Moon y D.E. Spencer* formularon la *distribución de luminancia* de un cielo completamente nublado [Figura 95] que luego sería adoptada por el *Comité Internacional de la Iluminación (CIE - Commission Internationale d'Eclairage)* en 1955 como *Cielo Nublado Estándar CIE (CIE Standard Overcast Sky)* [63], modelo de cielo vigente hoy en día [21].

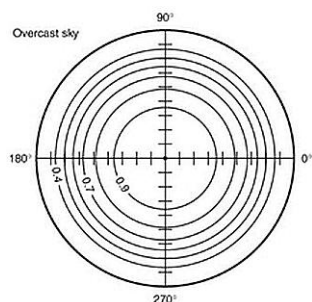


Figura 95: *Cielo Nublado Estándar CIE* [62].

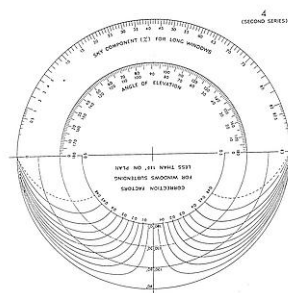


Figura 96: *Daylight protractor* [62].

Con la formulación de *Moon & Spencer* se desarrollaron métodos de cálculo de *DF*, analíticos y gráficos, cada vez más precisos, desde el transportador de luz natural (*Daylight protractor*) del *Centro de Investigación de la Edificación (Building Research Establishment - BRE)* en U.K. [Figura 96] hasta la calculadora de *DF*, pasando por la carta de granos de pimienta (*Dot Chart*) de *Pleijel*, o el método de flujo dividido (*Split Flux*) [62].

En el mismo año en que se estandarizó la formulación para el cielo nublado, *R. Kittler* propuso una formulación para las condiciones de cielo completamente despejado, que no fue adoptada por la *CIE* hasta 1965 (*CIE Standard Clear Sky*) [21]. Sin embargo la complejidad de las condiciones intermedias ha provocado diferentes propuestas teóricas, así como caracterizaciones y clasificación de los tipos de cielo. No ha sido hasta 1993, con la propuesta de *Perez* con su modelo de cielo *All-weather*, cuando se han podido asociar los registros de radiación solar de las estaciones meteorológicas con las diversas condiciones de cielo [21]. Este modelo fue normalizado por la *CIE* en 2003 bajo la denominación de *Cielo General Estándar CIE (CIE Standard General Sky)* [87].

Mientras tanto, en 1968 se desarrollan los primeros programas de cálculo de iluminación artificial (*LIGHT, Lumen -I*) y a partir de ahí, incorporando las formulaciones para las dos condiciones de cielo (nublado y despejado) y la mayor capacidad computacional, estos programas se complejizaron, dando cabida al cálculo de la iluminación natural, expresado mediante el *Factor*

de *Iluminación Natural*. Se desarrollaron diversos algoritmos de cálculo computacional como los algoritmos de transferencia de flujo de *DiLaura* (1978), los algoritmos de *trazado de rayos* de *Whitted* (1979) o los algoritmos de la *radiosidad* de *Modesty Selkowitz* (1982) [51].

El método de los *Coefficientes de Luz Natural (Daylight Coefficients -DC)* [Figura 97] de *Tregenza* (1983) junto con los algoritmos de *trazado inverso de rayos* (1986) son las bases del programa de cálculo de iluminación natural *Radiance* (1988) [76], considerando distintas situaciones «congeladas» de cielo. La combinación del *Cielo General Estándar CIE* junto con el motor de cálculo de *Radiance* dio lugar al desarrollo del programa *DAYSIM* (2000) [88]: el primer programa con el que se pueden calcular valores de *iluminancia (E)* en cada punto para cada momento del año en función de los datos climáticos [109], conocidos como programas de *Simulación Dinámica de Iluminación Natural (Dynamic Daylight Simulation -DDS)* o *Modelación climática de la Luz Natural (Climate Based Daylight Modelling -CBDM)*. En base al comportamiento humano, *DAYSIM* crea horarios de operación de los controles de la instalación de iluminación artificial, para ser incorporados a los programas de simulación energética, concretamente a *Energyplus* (2001) [89].

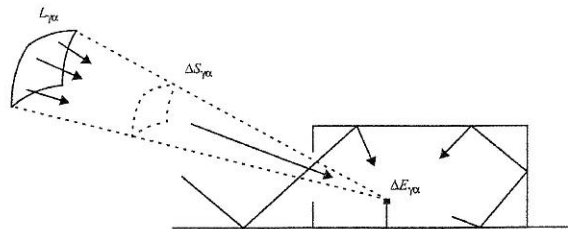


Figura 97: Concepto de *Coefficientes de Luz Natural* [110].

Esta cantidad de información arrojada por el cálculo computacional, dio lugar al desarrollo de nuevos indicadores de iluminación natural que incorporan la variable temporal de la iluminación natural, no considerada de forma continua hasta este momento [13]. La *Autonomía de Luz Natural (Daylight Autonomy -DA)* actualizada por *C. Reinhart* en 2001 y los rangos *Iluminancia Natural Útil (Useful Daylight Illuminance -UDI)* desarrollados por *J. Mardaljevic* en 2005 son *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (Dynamic Daylight Metrics -DDMs)* que tratan estadísticamente estos valores horarios de *iluminancia* en cada punto del plano de trabajo.

### 2.2.2.1 Modelos de cielo

El estudio de la iluminación natural supone la valoración de la iluminación generada por las fuentes naturales (Sol y cielo) en un punto determinado. Es por tanto una cuestión de análisis del flujo de luz generado por estas fuentes y la iluminación que producen. La magnitud del flujo de luz depende, entre otros, de la radiación de la fuente [21].

La iluminación que produce el cielo depende de su *luminancia (L)*. Ésta varía conforme a una serie de parámetros meteorológicos, estacionales y geométricos que son difíciles de sistematizar [87]. Es por esto que durante la primera mitad del siglo XX los mayores esfuerzos de investigación recayeron en la medición de la *distribución de luminancias* de la bóveda celeste [51]. La consideración de la complejidad de las interacciones entre la Tierra y el Sol y la observación experimental dieron lugar a la creación de diversos modelos de cielo que describen cómo y cuánta es la luz que proviene del Sol y la bóveda celeste [21].

Entre los modelos de cielo desarrollados, cabe destacar los aprobados por el *Comité Internacional de la Iluminación (CIE -Commission Internationale d'Eclairage)* como modelos patrón para calcular la *distribución de luminancias* de un cielo completamente nublado (*CIE Standard Overcast Sky, Moon & Spencer*, aprobado en 1955) y de un cielo azul despejado (*CIE Standard*

*Clear Sky*, R. Kittler, aprobado en 1965) [63]. Sin embargo, para las situaciones intermedias entre ambos modelos de cielo no se llegaron a definir modelos de *distribución de luminancias* que fueran universalmente aceptados y normalizados, dando lugar a diversas aproximaciones.

La gran cantidad de estaciones meteorológicas que recogen datos de radiación solar frente a aquellas que obtenían datos lumínicos [21] [111] y la incertidumbre sobre las situaciones intermedias de cielo dio lugar a que *Perez, Seals y Michalsky* [91] formularan el modelo *All-weather Sky* en 1993 a partir de modelos de conversión de la *irradiancia (E)* en *iluminancia (Ev)*, consiguiendo de este modo, caracterizar lumínicamente cualquier condición de cielo que tiene lugar a lo largo del año [21]. Este modelo de cielo fue aprobado por la *CIE* en 2003 bajo la denominación de *Cielo General Estándar CIE (CIE Standard General Sky)* [87].

La formulación del modelo de cielo de *Perez* representa un hito en el conocimiento de la fuente de iluminación natural ya que ha supuesto la obtención de las condiciones de cielo locales en base a las condiciones climáticas propias del lugar en que se quiera conocer la disponibilidad de luz natural: Un modelo de cielo dinámico en base climática permitiendo la transición de las diferentes condiciones de cielo en base horaria o sub-horaria frente al sistema de condiciones estáticas anterior.

Aunque existen varios modelos de cielo, reconocidos por la *CIE* y otras formulaciones teóricas, por su relevancia en el desarrollo de este trabajo, sólo se exponen a continuación los fundamentos del modelo de *Cielo Nublado Estándar CIE* y el modelo de *Cielo General Estándar CIE*.

### *Cielo Nublado Estándar CIE*

El modelo de distribución de *Cielo Nublado Estándar CIE* se basa en un cielo completamente nublado en el que el Sol y su posición no se aprecian. El paso de la radiación a través de las nubes normalmente produce una luz blanquecina debido al esparcimiento de la luz afectando a todas las frecuencias de la luz.

Las mediciones realizadas con el cielo completamente nublado en diferentes partes del mundo demostraron que la *distribución de luminancia* es bastante parecida a un patrón en el que el cielo es más brillante en el cenit y la *luminancia* decrece sistemáticamente hasta el horizonte tomando un valor igual a la tercera parte del valor del cenit [62]. En este tipo de cielo, la *luminancia* en cualquier punto a la misma elevación sobre el horizonte es la misma, independientemente de la altitud del Sol.

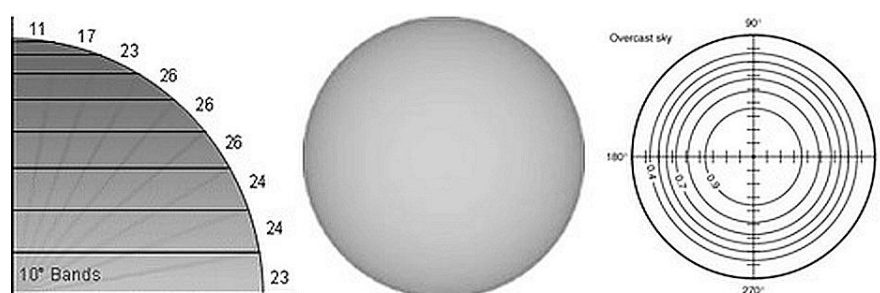


Figura 98: *Distribución de luminancias del Cielo Nublado Estándar CIE* [62] [105].

La formulación matemática de la *distribución de luminancias* de un cielo completamente nublado no-uniforme fue propuesta por primera vez por *Moon & Spencer* (1942). La relación entre la *luminancia* del cenit y el horizonte es de 3:1 y se describe mediante la relación trigonométrica [87]:

$$L_y = L_z (1 + 2 \sin \theta) / 3$$

Ecuación 2: Formulación del modelo de *Cielo Nublado* (Moon & Spencer, 1942) [87].



La *luminancia* de un punto de la bóveda celeste ( $L_y$ ) se obtiene a partir de la *luminancia cenital* ( $L_z$ ) y la *altitud* ( $\gamma$ ) de dicho punto. La fórmula tal como se propuso originariamente no era completamente general debido a la influencia que ejercen las propiedades reflectoras del terreno.

Para dar una mayor precisión al cálculo de la iluminación natural de interiores, la CIE adoptó en 1955 la fórmula de *Moon & Spencer* como el estándar de una *distribución de luminancia relativa* de cielo de acuerdo con las medidas obtenidas en diferentes partes del mundo, para la *distribución de luminancia* de un cielo nublado.

El *Cielo Nublado Estándar CIE* se presentó como un punto de partida para el diseño en climas donde la prevalencia de cielos nublados era suficiente como para justificar la consideración del cielo nublado como una condición de diseño crítica. Se consideró, además, que la consideración de las condiciones más adversas era un procedimiento apropiado en aquellos lugares en los que estas condiciones pudieran representar un número significativo de ocasiones a lo largo del año [62].

### **Cielo General Estándar\_CIE**

Los modelos de cielo normalizados por la CIE (*CIE Standard Overcast Sky* y *CIE Standard Clear Sky*); fueron desarrollados en una serie de publicaciones entre 1955 y 1996 [63] [87]. Estos modelos muestran una condición de cielo con una *distribución de luminancias* determinada para un momento determinado, pero en realidad la *distribución de luminancias* del cielo cambia durante el curso del día con la posición del Sol y depende del clima y de la meteorología.

Para conocer realmente la *distribución de luminancias* del cielo de forma horaria la CIE creó el *Programa Internacional de Medición de Luz Natural (International Daylight Measurement Programme -IDMP)* [111] en 1991, donde sólo 15 estaciones medían la *distribución de luminancias* de la bóveda celeste. Aún hoy en día el número de estaciones sigue siendo escaso, por lo que esta información es de difícil accesibilidad y sólo está disponible para ciertas localizaciones. Ante este panorama, *Perez* abordó la caracterización del cielo a través de mediciones rutinarias como la *irradiancia* ( $E$ ).

Los valores de *irradiancia* medidos en las estaciones meteorológicas se pueden convertir en valores equivalentes de *iluminancia* ( $E_v$ ) siempre que se conozca la *eficacia luminosa* ( $k$ ) de la radiación natural (unidades de radiación visible por unidad de radiación total) [1] [21]. La *eficacia luminosa* de la radiación mide la parte de la energía electromagnética que se emplea en iluminar y se obtiene dividiendo el *flujo luminoso* ( $F$ ) y el *flujo radiante* ( $\varphi$ ).

La eficacia luminosa de la radiación tiene un valor máximo posible de 683 lm/W para una longitud de onda de 555 nm (verde), que corresponde con la máxima sensibilidad del ojo humano conforme a la *curva espectral de sensibilidad fotópica CIE* [112] [113]. La *eficacia luminosa* depende de la altitud del Sol, de la nubosidad y del contenido de vapor de agua en la atmósfera. Experimentalmente, estos valores se obtienen mediante las medidas de *iluminancia* e *irradiancia* medias en un plano específico, normalmente horizontal [112].

$$k \text{ (lm/w)} = ( \bar{E}_v \text{ (lm/m}^2) ) / ( \bar{E} \text{ (w/m}^2) )$$

Ecuación 3: *Eficacia luminosa* [112].

La obtención de valores de *iluminancia difusa* a partir de los datos meteorológicos básicos en diversas superficies inclinadas requiere del conocimiento de la *distribución de luminancia* del cielo. Las *distribuciones de luminancia* normalizadas se expresan como la relación entre la *luminancia* de un punto del cielo y la *luminancia* del cénit. Por tanto, es necesario conocer la variación de la

*luminancia* del cénit de acuerdo con estos parámetros, de fácil accesibilidad, para obtener los valores absolutos de *luminancia* en cada punto del cielo [113].

El modelo de *luminancia* del cielo de *Perez* se compone de dos modelos independientes:

- El modelo de eficacia luminosa que relaciona las tres componentes básicas de la radiación (*irradiancia directa, global y difusa*) con su equivalente fotópica (*iluminancia directa, global y difusa*), expresadas en lumen por vatio. *Perez* define la *iluminancia* como el rendimiento del Sol/cielo, como fuentes de luz, cuando su espectro se compara con la función de transferencia del ojo humano (*curva espectral de sensibilidad fotópica CIE*).
- El modelo de distribución de luminancias proporciona la distribución luminosa del cielo en base a la fecha, la hora y las *iluminancias directa y difusa*, creada a partir de la generalización de la formulación matemática del modelo de *Cielo Despejado Estándar CIE*. Este modelo también es conocido como el modelo de cielo *All-weather* (1993) [91], que dio lugar al modelo de *Cielo General Estándar CIE (CIE Standard General Sky)*, adoptado por la *CIE* en 2003 [87].

### Modelo de eficacia luminosa

*R. Perez* [91] define para cada componente de la radiación –global, directa y difusa –un modelo de *eficacia luminosa* basado en cuatro componentes básicos que permiten parametrizar todas las condiciones de insolación: desde el cielo nublado al cielo despejado. Para el cálculo de estos componentes básicos se necesitan los datos horarios o sub-horarios de *irradiancia directa y global*, así como datos sub-horarios de la temperatura de rocío superficial para aquellos modelos en los que se consideran los efectos espectrales. Los cuatro componentes básicos son:

1. El ángulo cenital del Sol ( $Z$ )
2. La claridad del cielo ( $\epsilon$ ) dado por la siguiente ecuación:

$$\epsilon = [(E_{dh} + E_d) / (E_{dh} + kZ^3)] / (1 + kZ^3)$$

Ecuación 4: Claridad del cielo [112].

- $E_{dh}$  es la *irradiancia* horizontal difusa,
  - $E_d$  es la *irradiancia* directa de incidencia normal,
  - $k$  es una constante igual a 1.041 para  $Z$  expresada en radianes.
3. El brillo del cielo ( $\Delta$ ) dado por la siguiente ecuación:

$$\Delta = (E_{dh} \times m) / E_o$$

Ecuación 5: Brillo del cielo [112].

Donde:

- $m$  es la masa de aire óptica relativa
  - $E_o$  es la *irradiancia* extraterrestre.
4. El contenido de agua precipitable en la atmósfera ( $W$ ), en cm, dado por la siguiente ecuación:

$$W = e^{0.07 \times Td - 0.075}$$

Ecuación 6: Contenido de agua precipitable en la atmósfera [112].

Donde:

- $Td$  (°C) es la temperatura de rocío superficial (obtenida cada 20 minutos)

Todos los modelos tienen una estructura común representada por la siguiente ecuación:

$$Y = X \times F(\text{insolation condition, receptor/sun geometry})$$

Ecuación 7: Estructura de los modelos de *eficacia luminosa* [112].

Donde:

- Y es el parámetro a determinar (*iluminancia global*, por ejemplo),
- X es el parámetro dependiente de los datos básicos de entrada,
- F es la función de transferencia dependiente de los componentes básicos y la geometría solar.

La función F combina una formulación analítica para las variables  $\Delta$ , Z y W con una formulación discretizada (binaria) para la variable  $\epsilon$ . En la mayoría de los casos la función F se puede expresar como:

$$F(\epsilon, \Delta, Z, W) = a_i(\epsilon) + b_i(\epsilon) \cdot f(W) + c_i(\epsilon) \cdot g(Z) + d_i(\epsilon) \cdot h(\Delta)$$

Ecuación 8: Expresión generalizada de la función F de condiciones de insolación [112].

Donde:

- «f», «g» y «h» son funciones analíticas,
- «a», «b», «c» y «d» son funciones discretas representadas por vectores de 8 términos que corresponden con ocho valores de  $\epsilon$ , que se optimizaron para tener en cuenta la variabilidad observada de la distribución de radiación del cielo.

$\epsilon$	categoría	Límite inferior	Límite superior
1	Cielo nublado	1	1.065
2		1.065	1.230
3		1.230	1.500
4		1.500	1.950
5		1.950	2.800
6		2.800	4.500
7		4.500	6.200
8	Cielo despejado	6.200	-----

Tabla 4: Valores binarios de  $\epsilon$  [112].

De forma empírica, *Perez* obtuvo, para cada binomio de  $\epsilon$ , los valores de los coeficientes «a<sub>i</sub>», «b<sub>i</sub>», «c<sub>i</sub>» y «d<sub>i</sub>» correspondientes a la eficacia luminosa global, directa y difusa, así como los correspondientes a la luminancia del cénit, tal como se muestran en la Tabla 5:

$\epsilon$	a <sub>i</sub>	b <sub>i</sub>	c <sub>i</sub>	d <sub>i</sub>	$\epsilon$	a <sub>i</sub>	b <sub>i</sub>	c <sub>i</sub>	d <sub>i</sub>
<i>Eficacia luminosa Global</i>					<i>Eficacia luminosa Difusa</i>				
1	96.63	-0.47	11.50	-9.16	1	97.24	-0.46	12.00	-8.91
2	107.54	0.79	1.79	-1.19	2	107.22	1.15	0.59	-3.95
3	98.73	0.70	4.40	-6.95	3	104.97	2.96	-5.53	-8.77
4	92.72	0.56	8.36	-8.31	4	102.39	5.59	-13.95	-13.90
5	86.73	0.98	7.10	-10.94	5	100.71	5.94	-22.75	-23.74
6	88.34	1.39	6.06	-7.60	6	106.42	3.83	-36.15	-28.83
7	78.63	1.47	4.93	-11.37	7	141.88	1.90	-53.24	-14.03
8	99.65	1.86	-4.46	-3.15	8	152.23	0.35	-45.27	-7.98

€	a <sub>i</sub>	b <sub>i</sub>	c <sub>i</sub>	d <sub>i</sub>	€	a <sub>i</sub>	c <sub>i</sub>	c <sub>i</sub> '	d <sub>i</sub>
<i>Eficacia luminosa Directa</i>					<i>Luminancia del cémit</i>				
1	57.20	-4.55	-2.98	117.12	1	40.86	26.77	-29.59	-45.75
2	98.99	-3.46	-1.21	12.38	2	26.58	14.73	58.46	-21.25
3	109.83	-4.90	-1.71	-8.81	3	19.34	2.28	100.00	0.25
4	110.34	-5.84	-1.99	-4.56	4	13.25	-1.39	124.79	15.66
5	106.36	-3.97	-1.75	-6.16	5	14.47	-5.09	160.09	9.13
6	107.19	-1.25	-1.51	-26.73	6	19.76	-3.88	154.61	-19.21
7	105.75	0.77	-1.26	-34.44	7	28.39	-9.67	151.58	-69.39
8	101.18	1.58	-1.10	-8.29	8	42.91	-19.62	130.80	-164.08

Tabla 5: Coeficientes de los modelos de *eficacia luminosa* directa y de *luminancia del cémit* [87].

A partir de los componentes básicos, se obtienen las siguientes formulaciones para convertir la *irradiancia* global (E<sub>g</sub>), difusa horizontal (E<sub>d<sub>h</sub></sub>) y directa (E<sub>d</sub>) en sus homólogos de *iluminancia* (E<sub>v<sub>g</sub></sub>, E<sub>v<sub>d<sub>h</sub></sub></sub> e E<sub>v<sub>d</sub></sub>):

$$E_{vg} = E_g [a_i + b_i W + c_i \cos(Z) + d_i \ln(\Delta)]$$

Ecuación 9: Conversión de *irradiancia global* a *iluminancia global* [112].

$$E_{vdh} = E_{dh} [a_i + b_i W + c_i \cos(Z) + d_i \ln(\Delta)]$$

Ecuación 10: Conversión de *irradiancia difusa* a *iluminancia difusa* [112].

$$E_{vd} = \max \{ 0, E_d [a_i + b_i W + c_i e^{(5.73 \cdot Z - 5)} + d_i \Delta] \}$$

Ecuación 11: Conversión de *irradiancia directa* a *iluminancia directa* [112].

### Modelo de distribución de luminancias

El *modelo de distribución de luminancias* o *modelo All-weather* es capaz de reproducir una gran variedad de condiciones de cielo, desde perfectamente nublado hasta totalmente despejado. La adopción de este modelo por parte de la *CIE* tiene dos propósitos: ser una base universal para la clasificación de las distribuciones medidas de *luminancia* del cielo, y proporcionar un método para calcular la *luminancia* del cielo para ser utilizada en el cálculo de la iluminación natural [87].

En este modelo, la *luminancia* de cualquier punto del cielo viene determinada por la *luminancia del cémit* (L<sub>z</sub>). *Perez* define la *luminancia del cémit* mediante un modelo de pseudo-*eficacia luminosa* donde relaciona la *luminancia del cémit* con la *irradiancia difusa* (E<sub>d<sub>h</sub></sub>):

$$L_z = E_{dh} [a_i + c_i \cos(Z) + c_i' e^{-3Z} + d_i \Delta]$$

Ecuación 12: Obtención de la *luminancia del cémit* a partir de la *irradiancia difusa* [112].

Los coeficientes a<sub>i</sub>, c<sub>i</sub>, c<sub>i</sub>' y d<sub>i</sub> se muestran en la Tabla 5.

La *distribución de luminancias* que proporciona el modelo tiene las siguientes características:

- Son simétricas respecto al meridiano solar y son funciones de la distancia angular (ζ<sub>s</sub>) entre el Sol y el cémit.
- La *luminancia* relativa de cualquier punto del cielo depende de la menor distancia angular entre el elemento de cielo y la posición del Sol (X) entre el elemento de cielo considerado y el Sol, y de la distancia angular (ζ) entre el cenit y el elemento de cielo considerado. Se define mediante dos funciones:
  - el *indicador del esparcimiento relativo* (f(X)) representa el indicador de la dispersión de la luz en las moléculas de la atmósfera.

- o la gradación de luminancia entre el horizonte y el cenit ( $\psi(\zeta)$ ).

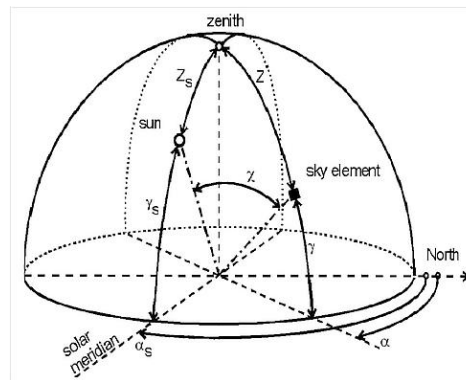


Figura 99: Ángulos que definen la posición del Sol y un elemento de cielo [87].

La relación de *luminancias* entre la *luminancia*,  $L_\alpha$ , de un elemento arbitrario de cielo respecto a la *luminancia*,  $L_z$ , del cenit, tomada como *luminancia* de referencia, es:

$$L_\alpha / L_z = (\psi(\zeta) \times f(X)) / (\psi(0) \times f(\zeta_s)) =$$

$$= ([1 + a^{(b/\cos(\zeta))}] \times [1 + c^{[dX - d\pi/2]} + e \cdot \cos^2 X]) / ([1 + a^b] \times [1 + c^{[d\zeta_s - d\pi/2]} + e \cos^2 X])$$

Ecuación 13: *Luminancia* relativa de un elemento arbitrario de cielo [87].

Los coeficientes «a», «b», «c», «d», y «e» se obtuvieron de forma experimental y se ajustaron para considerar las *distribuciones de luminancia* existentes entre el cielo nublado y el cielo despejado. Se clasifican en seis grupos de valores de «a» y «b» para la función de gradación  $\psi(\zeta)$  y seis grupos de valores de «c», «d» y «e» para el indicador de la dispersión  $f(X)$ .

- El coeficiente «a» representa el brillo relativo del horizonte respecto al brillo del cenit, pudiendo ser más oscuro ( $a > 0$ ) si son condiciones de cielo nublado, o más brillante ( $a < 0$ ) si son condiciones de cielo despejado.
- El coeficiente «b» permite ajustar el gradiente de *luminancia* cerca del horizonte. Los valores más cercanos a 0 presentan mayores contrastes, y los más alejados una gradación más suave.
- La magnitud del coeficiente «c» es proporcional a la intensidad relativa de la región circumsolar o aureola solar.
- El coeficiente «d» representa la dimensión (grosor) de la región circumsolar
- el coeficiente «e» considera la intensidad relativa de la luz que recibe la superficie de la tierra (considerando el efecto del esparcimiento de la luz en las moléculas).

A raíz de la definición del modelo de *Perez*, la *CIE* en su propósito de clasificación y descripción de los tipos de cielo, estableció 15 modelos diferentes de condiciones de cielo. El modelo de *Cielo General Estándar CIE*, por tanto, es un conjunto de 15 *distribuciones de luminancia* de cielo que lo clasifica desde muy nublado a despejado, donde el *Cielo Despejado Estándar CIE* está incorporado como caso particular y el *Cielo Nublado Estándar CIE* está incorporado como fórmula separada [87], siendo el tipo de cielo número 16. Por tanto, en el documento publicado por la *CIE* existen dos modelos de *Cielo Nublado*, el modelo «tradicional» formulado por *Moon & Spencer*, y el modelo elaborado por *R. Perez*, a raíz de la normalización de los coeficientes.

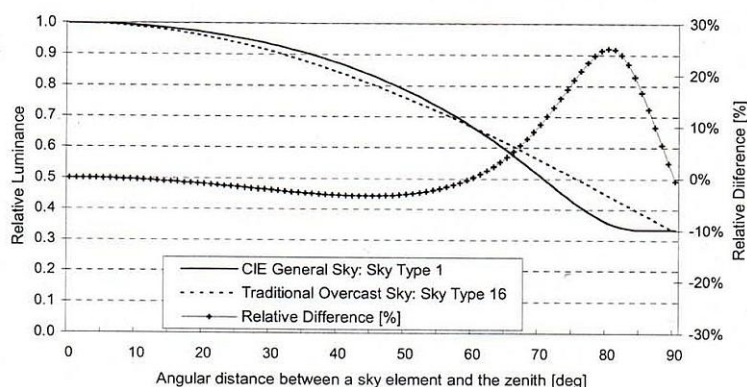


Figura 100: Diferencia entre el modelo de cielo «tradicional» y el elaborado por Perez [87].

Tipo	$\psi(\zeta)$	$f(x)$	a	b	c	d	e	Distribución de luminancia
1	I	1	4.0	-0.7	0.0	-1.0	0.0	Cielo Nublado Estándar CIE, fuerte gradación de luminancia hacia el cenit, uniforme acimutalmente
2	I	2	4.0	-0.7	2.0	-1.5	0.15	Cielo nublado, con una fuerte gradación de luminancia y un ligero brillo entorno al Sol.
3	II	1	1.1	-0.8	0.0	-1.0	0.0	Cielo nublado, con una moderada gradación y uniforme acimutalmente.
4	II	2	1.1	-0.8	2.0	-1.5	0.15	Cielo nublado, con una moderada gradación y un ligero brillo entorno al Sol.
5	III	1	0.0	-1.0	0.0	-1.0	0.0	Cielo de luminancia uniforme
6	III	2	0.0	-1.0	2.0	-1.5	0.15	Cielo parcialmente nublado, sin gradación hacia el cenit, con un ligero brillo entorno al Sol.
7	III	3	0.0	-1.0	5.0	-2.5	0.30	Cielo parcialmente nublado, sin gradación hacia el cenit, con la región circumsolar más brillante.
8	III	4	0.0	-1.0	10.0	-3.0	0.45	Cielo parcialmente nublado, sin gradación hacia el cenit, corona solar marcada.
9	IV	2	-1.0	-0.55	2.0	-1.5	0.15	Cielo parcialmente nublado, con el Sol oculto.
10	IV	3	-1.0	-0.55	5.0	-2.5	0.30	Cielo parcialmente nublado, con la región circumsolar más brillante.
11	IV	4	-1.0	-0.55	10.0	-3.0	0.45	Cielo azul claro con la corona solar marcada
12	V	4	-1.0	-0.32	10.0	-3.0	0.45	Cielo Despejado Estándar CIE, con baja turbiedad de la luminancia.
13	V	5	-1.0	-0.32	16.0	-3.0	0.30	Cielo Despejado Estándar CIE, atmósfera contaminada.
14	VI	5	-1.0	-0.15	16.0	-3.0	0.30	Cielo despejado turbio con una gran corona solar.
15	VI	6	-1.0	-0.15	24.0	-2.8	0.15	Cielo azul claro turbio con una gran corona solar.

Tabla 6: Cielo General Estándar CIE. Integración de 15 tipos diferentes de cielo [87].

Para obtener la distribución luminosa de cualquier tipo de cielo basta con obtener los datos de *irradiación directa* y *difusa* contenidos en el *archivo climático* de la localidad, para convertirlas en primera instancia en *iluminancias* empleando el *modelo de eficacia luminosa de Perez*, y luego en distribución luminosa del cielo empleando el *modelo All-weather* [84].

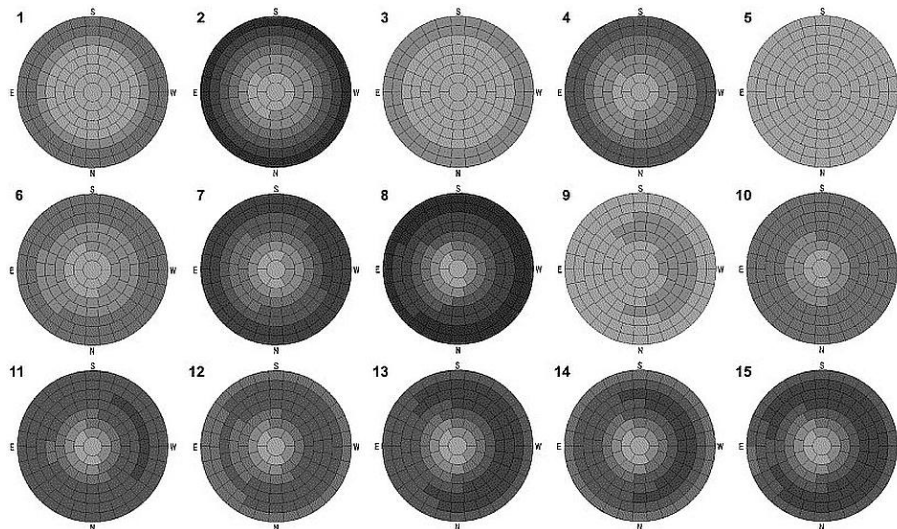


Figura 101: *Distribución de luminancias de los 15 modelos incluidos en el Cielo General Estándar CIE* [83].

El *modelo de cielo All-weather* ha demostrado ser un buen modelo teórico de cielo con una adecuada transición entre las diferentes condiciones de iluminación que tienen lugar en diversas condiciones climáticas. También se ha demostrado que aproximadamente cuatro tipos de cielo del *Cielo General Estándar CIE* pueden dar una buena caracterización de las condiciones de luz natural exterior, aunque los tipos concretos de cielo puedan diferir en función del clima.

Como se ha visto, el avance en el conocimiento sobre la *distribución de luminancias* del cielo no sólo ha permitido la definición de diferentes modelos teóricos que representan situaciones concretas de la realidad, sino también la vinculación de estos modelos teóricos con los archivos climáticos locales [21]. Con el *Cielo General Estándar CIE* es posible obtener la *distribución de luminancias* del cielo, y con ello el tipo clasificado de cielo correspondiente, para cada momento del año registrado en el *archivo climático*. Este modelo de cielo, por tanto, es el que actualmente más se acerca a la realidad local, eliminando una parte considerable de incertidumbre de las simulaciones informáticas.

El *Cielo General Estándar CIE* es, por su fiabilidad y por la precisión que aporta, el modelo de cielo utilizado para la determinación de las condiciones de iluminación natural de los modelos de cálculo de esta tesis.

### 2.2.2.2 Factor de Iluminación Natural

En cuanto a los indicadores de iluminación natural, fue *A.P. Trotter* quien definió por primera vez en 1895 el concepto de *Factor de Iluminación Natural (FIN, Daylight Factor -DF)* como “*la relación entre el nivel de iluminación en un punto interior y el nivel de iluminación (E) simultánea de un punto en un plano horizontal exterior, debido a la luz que recibía de la bóveda celeste sin presencia de obstrucciones y sin considerar la luz directa proveniente del Sol*” [62].

La idea de utilizar una relación de iluminancias para cuantificar la cantidad de iluminación natural en los edificios se estableció en 1909 cuando *Waldram* publicó una técnica de medición basada en iluminancias relativas. El motivo de trasfondo para utilizar valores relativos en vez de

valores absolutos era el de eliminar la dificultad de enfrentarse a continuas y, algunas veces, severas fluctuaciones en la intensidad de la luz natural [13].

$$DF = E_{\text{difusa interior}} / E_{\text{difusa exterior}} \times 100$$

Ecuación 14: Definición de *Factor de Iluminación natural* [62].

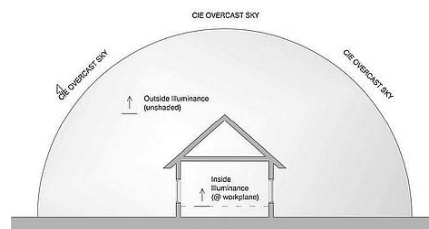


Figura 102: Concepto de *Factor de Iluminación natural*.

En un principio se utilizaba el concepto de *Factor de Cielo (Sky Factor -SF)*, introducido por *Waldram*, para cuantificar la contribución de la luz directa del cielo en la iluminación de un punto de un edificio. Pero con el tiempo, al incorporar la luz reflejada de las obstrucciones exteriores, las pérdidas de luz a través del acristalamiento, y las reflectancias de las superficies interiores, éste derivó en el *Factor de Iluminación Natural* [13] [57].

Para determinar el *DF* en un punto intervienen tres componentes de la luz diferenciados: la *Componente de Cielo (Sky Component -SC)*, la *Componente Reflejada Exterior (Externally Reflected Component -ERC)* y la *Componente Reflejada Interior (Internally Reflected Component -IRC)*, de forma que la iluminación natural total que recibe un punto interior es la suma de estas tres componentes [63].

$$DF = SC + ERC + IRC$$

Ecuación 15: Factor de Iluminación como suma componentes [62].

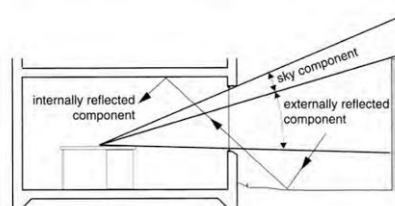


Figura 103: Componentes del *Factor de Iluminación Natural* [114].

La simplicidad de la formulación matemática del *Modelo de Cielo Completamente Nublado* de *Moon & Spencer* impulsó la creación de diversos métodos de cálculo del *Factor de Iluminación Natural* en base al cálculo detallado de cada uno de sus componentes.

La ventaja de calcular cada uno de las componentes separadamente es que los procedimientos de cálculo individuales que se desarrollaron se ajustan mejor a su propósito y se pueden emplear separadamente, y que, de esta forma, se puede realizar una valoración de la cantidad relativa de luz direccional y de luz difusa [62].

En 1955, tras los avances en la materia, *R.G. Hopkins* [62] volvió a definir el *Factor de Iluminación Natural* como “*la relación del nivel de iluminación para un punto dado debido a la luz recibida directa o indirectamente de un cielo con una distribución de luminancias asumida o conocida, respecto a la iluminación de un punto exterior en un plano horizontal que recibe la luz de la bóveda celeste de este tipo de cielo sin presencia de obstrucciones. La luz directa proveniente del Sol se excluye para ambos valores de iluminación*”.

La adopción del *Modelo de Cielo Completamente Nublado* por parte de *CIE* como *Cielo Nublado Estándar CIE* generalizó y normalizó el cálculo del *DF* utilizando este modelo de cielo [1] [4]. Desde entonces, el *Factor de Iluminación Natural* ha sido la medida de iluminación natural que ha prevalecido y cuya utilización ha sido ampliamente aceptada para el estudio de iluminación natural de los edificios [13] [115]. Su popularidad probablemente se debe al hecho de que ha sido la



única métrica aceptada para cuantificar la iluminación natural, además de su simplicidad de cálculo [110].

Aunque el método de cálculo del  $DF$  que se ha generalizado se basa en el modelo de *Cielo Nublado Estándar CIE*, es decir en la componente difusa y reflejada de la iluminación natural, el concepto también acepta cualquier *distribución de luminancias* de cielo conocida, siempre que se elimine la componente directa solar. Sin embargo, pese a que se desarrollaron métodos de cálculo del  $DF$  para incluir las condiciones de cielo despejado, éstos sólo eran aplicables a condiciones específicas de posición solar y orientación de la ventana [51] [116]. En realidad, el cálculo del  $DF$  para condiciones de cielo distintas de las del *Cielo Nublado Estándar CIE* serían condiciones de cielo que no suceden en la realidad, ya que se considera que sólo en condiciones de cielo completamente nublado no hay presencia solar directa.

La ventaja de utilizar el  $DF$  calculado bajo condiciones de cielo nublado es que permite obtener una iluminación natural «base», a falta de incorporar la acción directa del Sol. Además, tiene la ventaja de que los resultados son intuitivos y fáciles de comunicar y que existen numerosos métodos de cálculo, desde simples hojas de cálculo hasta complejos y precisos programas informáticos [13] [115]. Precisamente, debido a la utilización del modelo de cielo nublado para su cálculo, el  $DF$  varía en función de ciertas condiciones del edificio: forma, elementos de su entorno, la reflectancia de sus superficies interiores, el tamaño del hueco, tipo de vidrio, etc., pero no varía ni con la localización ni con la orientación del edificio [1].

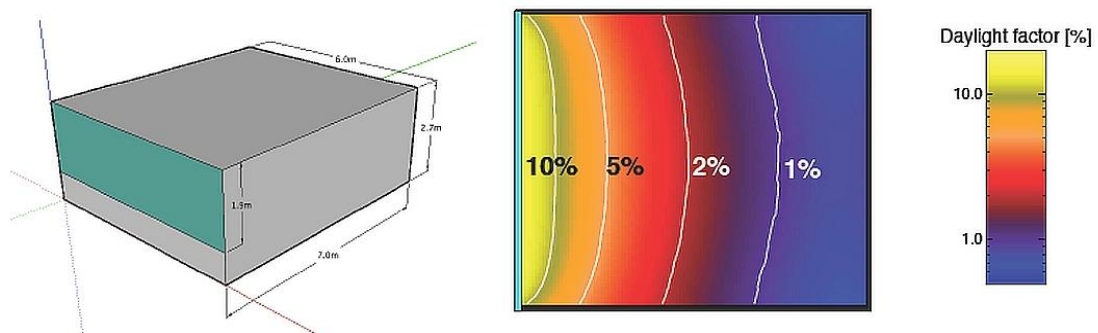


Figura 104: Representación gráfica del *Factor de Iluminación Natural* mediante isóneas [50].

Ya se ha visto que la *distribución de luminancias* del *Cielo Nublado Estándar CIE* es cilíndricamente simétrica, por lo cual cualquier punto de la bóveda celeste a la misma altitud tiene la misma luminancia, proporcionando la misma relación de iluminancias para cualquier orientación del edificio. Además, como el  $DF$  se basa en una condición de cielo «congelada» no considera las variaciones estacionales u horarias, no considera la acción solar directa ni las condiciones de variabilidad del cielo. Esto redundaba en que los estudios basados en el análisis del  $DF$  no aportan información sobre cuestiones tan importantes como el deslumbramiento [13] [117] o el efecto de las protecciones solares o de cualquier estrategia que dependa de la posición solar, su intensidad o la redirección de la luz solar directa [1].

### 2.2.2.3 Exposición solar

El cálculo de las condiciones de iluminación natural utilizando el *Factor de Iluminación Natural* aporta información sobre la iluminación difusa y reflejada que llega a un punto, eliminando la componente directa de la radiación solar. Con presencia del Sol en la bóveda celeste, su posición determina la entrada de luz solar directa proporcionando áreas de alta iluminación en el plano de trabajo [95], siendo su presencia un elemento clave en el diseño arquitectónico [1].

Para considerar este hecho, los estudios de iluminación natural se complementan con los estudios de soleamiento, que aportan información gráfica sobre la incidencia solar directa a lo largo del año sobre un determinado punto basado en la posición relativa del Sol, caracterizada por dos ángulos: el *acimut* ( $\alpha$ ) y la *altura solar* ( $\gamma$ ) [3]. Es decir, la luz solar directa, tradicionalmente, se estudia de forma cualitativa y no cuantitativa.

La *altura solar* se define como el ángulo, en un plano vertical, entre los rayos del Sol y la proyección de éstos sobre un plano horizontal. El *acimut* es el ángulo, medido en el plano horizontal, que forman la proyección de los rayos del Sol en este plano con el Sur (para el hemisferio Norte). Ambos ángulos, que definen la posición del Sol, depende de la latitud del lugar, el día del año y la hora solar del día [95].

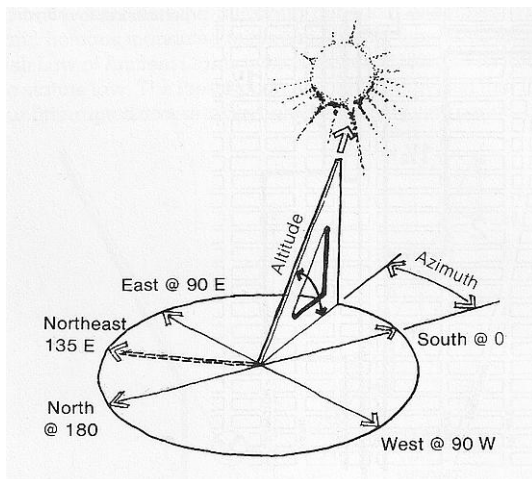


Figura 105: *Altitud y Acimut solar* [3].

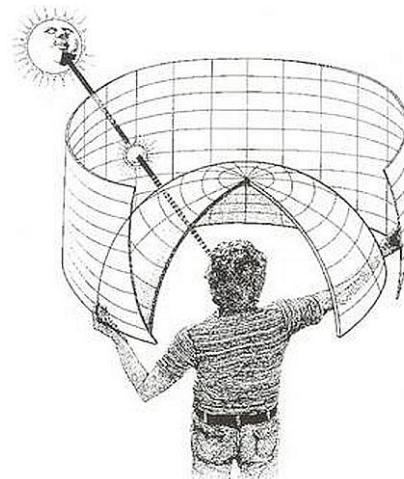


Figura 106: *Construcción de las cartas solares*

El estudio del asoleo se basa en la geometría de las trayectorias solares a lo largo del año para una determinada localización geográfica, determinada por su latitud y su longitud. Los *diagramas o cartas solares* son instrumentos gráficos que representan los cambios anuales de la trayectoria solar en la bóveda celeste mediante un único diagrama plano. En dichos diagramas se representan el *acimut* y la *altura solar* en cada momento del día para todos los días del año.

Existen diversas formas de representar gráficamente las trayectorias solares. Aunque todas se basan en las mismas ideas, difieren en dos puntos importantes [105]:

- El uso de Coordenadas Cartesianas o Polares
- La distribución del *acimut* y la *altura solar* en los ejes de representación

La Figura 107 muestra ejemplos de los métodos de proyección más utilizados. Las proyecciones circulares emplean las coordenadas polares para representar la *altura solar* y el *acimut* solar mientras que las proyecciones rectangulares utilizan las coordenadas cartesianas, normalmente el eje Y para la *altura solar* y el eje X para el *acimut*.

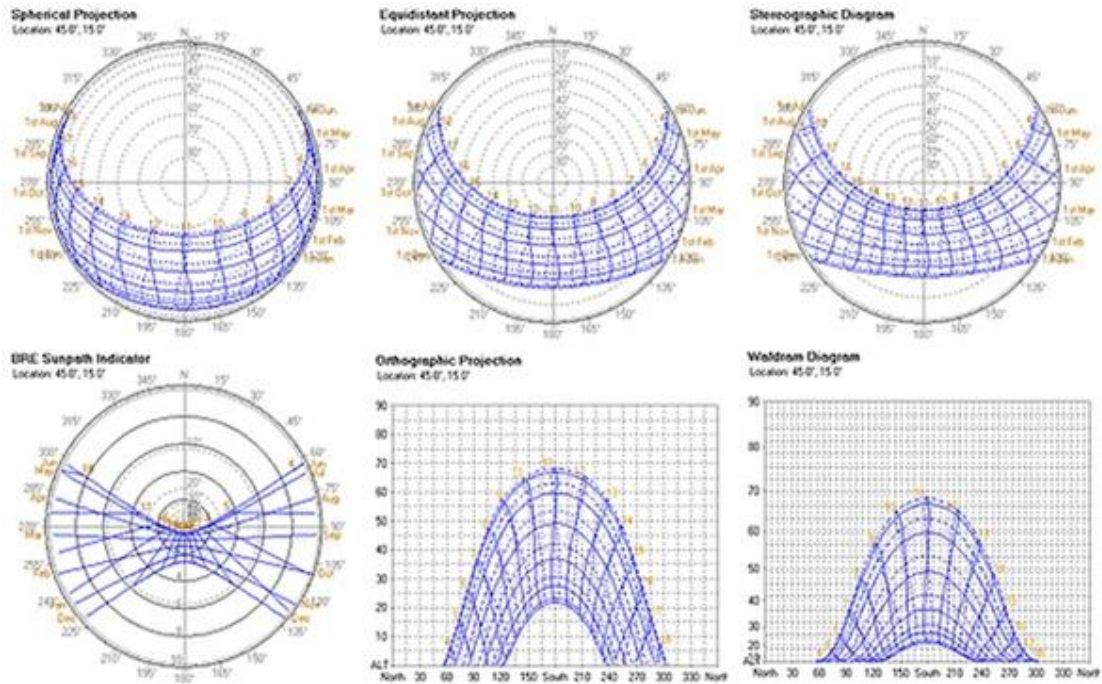


Figura 107: Principales tipos de proyecciones. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Proyección esférica, equidistante, estereográfica, según el método BRE, ortográfica y según el método de Waldram, obtenidas con el programa Ecotect [105].

Estos diagramas o cartas solares, para un punto determinado del espacio, pueden utilizarse para dibujar sobre los mismos el contorno de los elementos que suponen un obstáculo para el acceso solar de dicho punto (shading mask) y, de esta forma, determinar las horas en que dicho punto recibe incidencia solar directa a través de los elementos no opacos de la envolvente de dicho espacio de dicho punto (área sombreada de la Figura 108) [118].

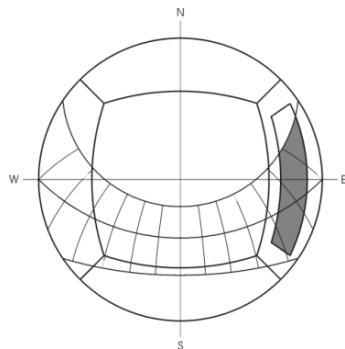


Figura 108: Análisis de asoleo de un punto en el interior de un espacio utilizando la proyección estereográfica.

Para conocer las condiciones de soleamiento de un espacio sería necesario realizar la proyección estereográfica de diferentes puntos del plano de trabajo, del mismo modo en que se analiza punto a punto las condiciones de iluminación natural.

Esto puede realizarse tanto para puntos del interior como del exterior, siendo esta última práctica un medio para obtener una representación gráfica de la exposición solar de un emplazamiento. Asimismo también es una herramienta efectiva a la hora de diseñar las protecciones solares para un determinado periodo del año.

El contorno de las obstrucciones a la exposición solar de un punto sólo depende de la configuración geométrica del espacio o del entorno, dependiendo de si se realiza un análisis de penetración solar en un espacio interior, o si se realiza un análisis de potencial de exposición solar de un emplazamiento [Figura 109], especialmente en las primeras fases de diseño de un edificio y no de la orientación o la latitud. No es hasta que se superpone con el diagrama solar cuando entra en juego el efecto de la orientación y la trayectoria solar.

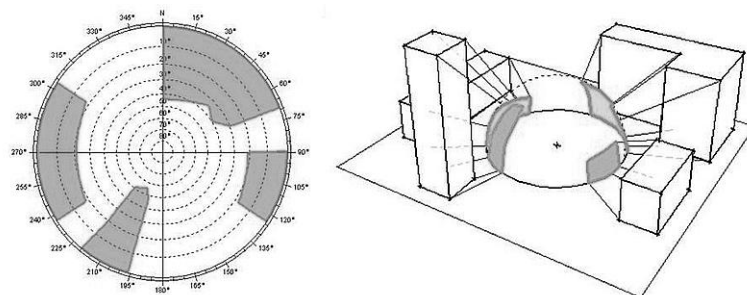


Figura 109: Análisis del potencial de exposición solar de un emplazamiento [105].

Para el cálculo del soleamiento de forma cuantitativa en la normativa británica [119] se establece el *método de las horas anuales de soleamiento probable (Annual probable sunlight hours method -APSH)*. En este método se utiliza un indicador que contiene 100 puntos, cada uno representando el 1% de las horas anuales de soleamiento probable.

Cuando no existen obstrucciones, el número total de horas de soleamiento probable anual asciende a 1486, por lo que cada punto de este indicador equivale a 14'86 horas. Estos puntos se integran en los diagramas solares, donde se representan las obstrucciones presentes en la trayectoria solar según cada punto de cálculo.

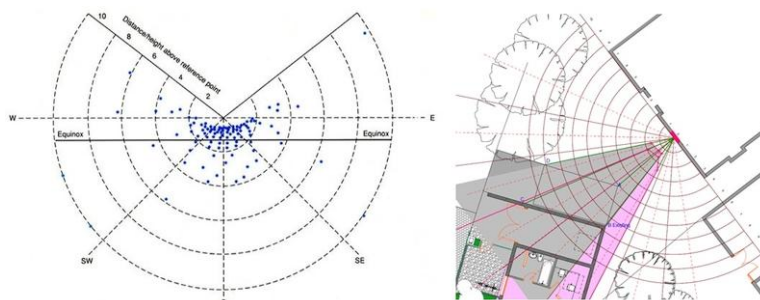


Figura 110: Cálculo del potencial de Soleamiento en un punto para Londres. Método APSH.

La posición relativa del Sol, por tanto, permite realizar un análisis sobre los momentos a lo largo del año en que un punto está expuesto a la acción directa del Sol, complementando los análisis de iluminación natural.

Sin embargo, este análisis no proporciona información sobre la intensidad de la radiación solar directa incidente, ni térmica ni en rango visible, siendo la radiación solar térmica directa uno de los mayores factores que intervienen en el análisis de las cargas térmicas de los edificios.

### 2.2.2.4 Modelación climática de la Luz Natural

La creación de edificios de bajo consumo energético ha puesto mucho énfasis en el análisis del comportamiento horario del mismo en las fases de diseño. En este paradigma, la evaluación de la iluminación natural juega un papel importante, ya que las condiciones de iluminación vienen determinadas por la configuración del edificio, difícilmente modificable en estadios posteriores.

Frente a las implicaciones que supone el estudio de iluminación natural realizado con el *Factor de Iluminación Natural (FIN, Daylight Factor -DF)*, basado en valores de iluminancia difusa y la dificultad para obtener medidas cuantificables no sólo de los valores absolutos de iluminancia, sino también de la efectividad de las estrategias de protección solar o de las posibles condiciones de deslumbramiento [117], la obtención de la iluminancia global en cada instante a partir de los datos climáticos estandarizados permite conocer el comportamiento de estos espacios frente a la luz

natural con bastantes visos de realidad, ya que dichos valores son suma de las componentes directa y difusa de iluminancia [1].

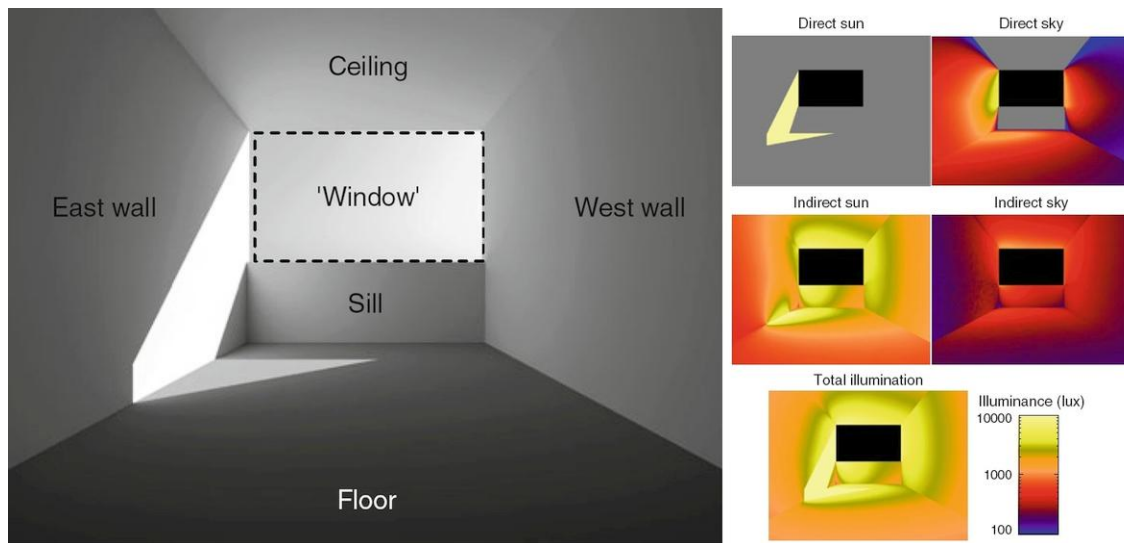


Figura 111: Componentes de la iluminancia global. J. Mardaljevic [1].

La obtención de estos valores es lo que se conoce como *Modelación climática de la Luz Natural (Climate Based Daylight Modelling -CBDM)*. Ésta se define como “*la predicción de varias cantidades radiantes o luminosas (por ejemplo: irradiancia, iluminancia, radiación y luminancia) utilizando las condiciones de Sol y cielo derivadas del conjunto de datos contenidos en los archivos climáticos normalizados*” [1] [50].

La obtención de las condiciones de iluminación natural a lo largo del año de cada uno de los puntos de un espacio supondría, entonces, la determinación de la *distribución de luminancias* de la bóveda celeste para cada instante y calcular el *nivel de iluminación* obtenido en cada punto bajo dicha condición de cielo [110].

Considerando que el año tiene 4380 horas diurnas (y otras tantas nocturnas), este proceso requeriría de una gran cantidad de tiempo de computación<sup>4</sup>, considerando, además, el tiempo de computación necesario para recalculer en cada momento las componentes reflejadas de la iluminación natural, especialmente la *componente reflejada interior* [110].

El concepto de *Coeficientes de Luz Natural (Daylight Coefficients -DC)* desarrollado por *Tregenza* y *Waters* en 1983 ha sido clave para que pudiera crearse la *CBDM* ya que permite eliminar la necesidad de recalculer para cada momento las reflexiones interiores. El concepto de *DC* se basa en considerar que el nivel de iluminación de cada punto de un espacio está vinculado con la porción de cielo que «ve» dicho punto, fijando, por tanto, la contribución relativa de las reflexiones interiores.

La *Modelación climática de la Luz Natural* se basa, por tanto, en el cálculo de *series temporales de luminancias e iluminancias* [110] [117] [120]. Ésta no habría sido posible sin la existencia del modelo de *Cielo General Estándar CIE (CIE Standard General Sky)* [87], sin el concepto de los *DC* y sin algoritmos de cálculo computacional, concretamente de *trazado de rayos (raytracing)*, implementado en el motor de cálculo *Radiance* [76], del que se tratará más adelante.

<sup>4</sup> Para calcular los 4380 valores horarios que se obtendrían en cada punto de del plano de trabajo. En el caso de querer obtener valores sub-horarios, el tiempo de cálculo se incrementa exponencialmente [1].

Este tipo de modelizado proporciona cantidades absolutas que dependen de la localización (expresado mediante el archivo climático estandarizado) y de la orientación del edificio, es decir, salvando los grandes invariantes del *Factor de Iluminación Natural* [Figura 112], además de la composición y configuración del edificio [117].

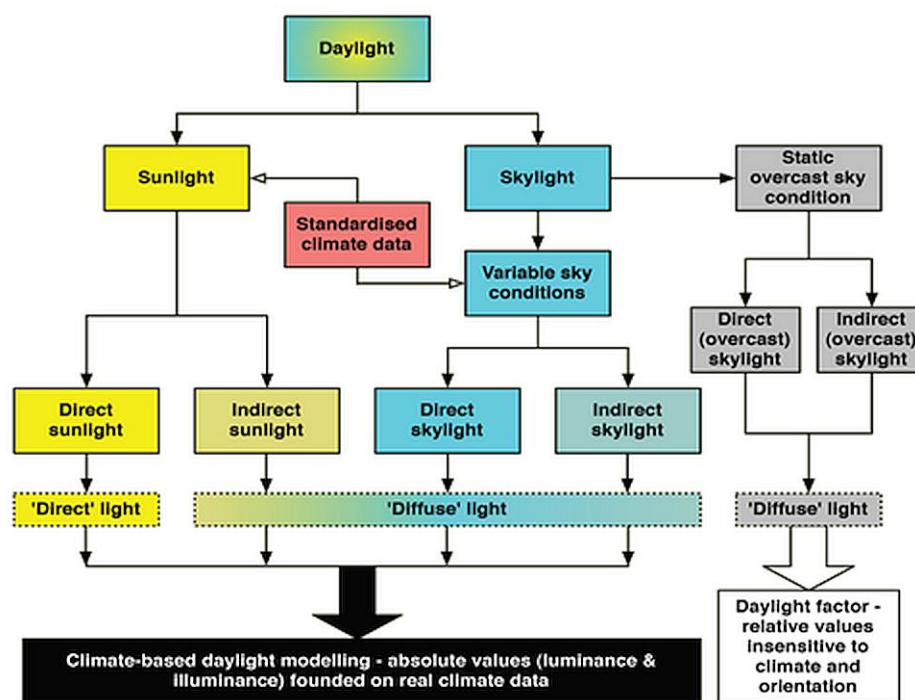


Figura 112: Simulación dinámica frente al cálculo del *Factor de Iluminación Natural*. J. Mardaljevic [96].

Para realizar un modelo dinámico de iluminación natural es necesario preparar un modelo tridimensional del espacio que se quiere estudiar, especificando las propiedades ópticas de las superficies, tanto interiores como exteriores, así como la determinación del número, localización y orientación de los sensores o puntos a estudiar en el interior del edificio [13]. Además, es necesario incorporar un archivo climático que contenga datos horarios de *irradiación directa* y *difusa* [109] para poder utilizar el *Cielo General Estándar CIE*.

La *Modelación climática de la Luz Natural* se realiza en dos fases: en primer lugar se calculan los *Coefficientes de Luz Natural* para cada sensor definido. En segundo lugar, estos *DC* se acoplan con los datos climáticos para determinar la *serie temporal anual de iluminancias y luminancias para cada punto* [84]. Ambas fases están completamente automatizadas en programas de cálculo como *ADELINÉ*, *DAYSIM*, *Spot* o *DIVA*.

Los dos principales métodos de análisis de los valores obtenidos son el análisis acumulativo, y el análisis de series temporales [1]. El análisis acumulativo es la predicción de algunas medidas agregadas de la luz natural (como la iluminancia total anual) en base al efecto acumulado de la luminancia (o radiancia) de las condiciones de Sol y cielo obtenidos a partir del archivo climático [1].

El análisis acumulativo puede ser utilizado para predecir el acceso solar y el micro-clima en entornos urbanos, la exposición a largo plazo de obras de arte y la determinación del «rendimiento» estacional de las estrategias de iluminación natural y protección solar en las primeras fases de diseño [1]. Las decisiones tomadas en base a los análisis acumulativos tienen el potencial de influir en el diseño de la forma del edificio, por lo que puede convertirse en una herramienta de diseño arquitectónico.

El análisis de las series temporales supone la predicción de medidas de forma instantánea en base a todos los valores horarios (o sub-horarios) recogidos en los archivos climáticos. El análisis de las series temporales, debido a su carácter instantáneo, ha dado lugar al desarrollo de los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (Dynamic Daylight Metrics -DDMs)* [1]. Estos indicadores se utilizan para evaluar todo el potencial de iluminación de un edificio, la ocurrencia de iluminancias o luminancias excesivas, y en el comportamiento de los sistemas de control de iluminación artificial cuyo funcionamiento depende de la luz natural en el espacio [117].

### **Coeficientes de Luz Natural**

Para considerar la variabilidad de la luminancia de la bóveda celeste, *P.R. Tregenza y I.M. Waters* desarrollaron en 1983 el concepto de *Coeficientes de Luz Natural (Daylight Coefficients - DC)* ofreciendo un medio para calcular los niveles de iluminación interior bajo varias condiciones de cielo y posiciones solares, aunque, debido a la complejidad de cálculos, éstos deben realizarse con el uso del ordenador [110].

Un *DC* es la relación numérica entre la intensidad luminosa de una porción de cielo y la cantidad de esta luz que llega al punto de estudio [121]. Los *Coeficientes de Luz Natural* representan la contribución de cada segmento de la bóveda celeste a la iluminancia total de un punto del espacio [122]. Este concepto considera que las iluminancias en el interior de una habitación no son, en general, proporcionales a la iluminancia exterior, pero dependen de la exacta distribución de luminancias del cielo que se produce en dicho momento. Por otro lado, un punto del interior de una habitación recibirá luz directa solo de ciertas áreas del cielo, de forma que su iluminancia es más sensible a los cambios de luminancia de ciertas partes del cielo que de otras [121]. El concepto de *Coeficiente de Luz Natural* relaciona, por tanto, la distribución de luminancias del cielo con la iluminancia en un punto en el interior de una habitación.

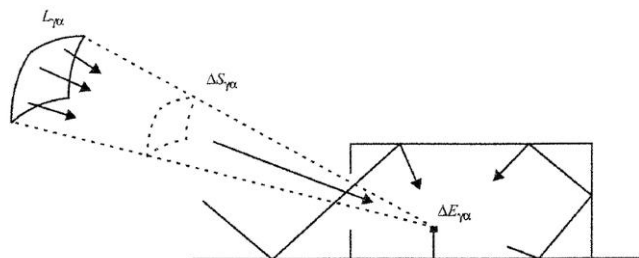


Figura 113: Fundamentos de los *Coeficientes de Luz Natural* [110].

Si  $\Delta E_{\gamma\alpha}$  es la iluminancia total producida un punto en una habitación debida a un elemento pequeño del cielo de *altitud*  $\gamma$  y *azimut*  $\alpha$ , entonces el *Coeficiente de Luz Natural (D  $\gamma\alpha$ )* es definido como:

$$D_{\gamma\alpha} = \Delta E_{\gamma\alpha} / (L_{\gamma\alpha} \Delta S_{\gamma\alpha})$$

Ecuación 16: Definición del *Coeficiente de Luz Natural* [110].

- $L_{\gamma\alpha}$  es la luminancia del elemento de cielo
- $\Delta S_{\gamma\alpha}$  es el ángulo sólido de la porción de cielo considerada [Figura 113].

La magnitud de cada *Coeficiente de Luz Natural* dependerá de las características físicas de la habitación así como del ambiente exterior. Sin embargo es independiente de la distribución de luminancias a lo largo de la bóveda celeste, ya que  $\Delta E_{\gamma\alpha}$  varía en proporción a  $L_{\gamma\alpha}$ . La iluminancia total  $E$  producida en un punto en el interior de una habitación es entonces:

$$E = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} D \gamma \alpha L \gamma \alpha \cos \gamma d\gamma d\alpha$$

Ecuación 17: Iluminancia total en un punto de una habitación [110].

Utilizando esta ecuación algebraica, las simulaciones anuales de iluminación natural pueden llevarse a cabo en cuestión de minutos [123]. La iluminancia de un punto debida a una porción de cielo de luminancia conocida se simula y almacena. Este procedimiento se realiza para cada porción de cielo. Entonces es posible, en principio, determinar la iluminancia interior para una condición arbitraria de Sol y/o cielo usando operaciones aritméticas relativamente simples con matrices [122].

Con el uso de los *Coefficientes de Luz Natural* se reduce el tiempo de computación ya que el tiempo empleado en el cálculo del *DC* para un cielo con *N* porciones es comparable al tiempo empleado para calcular *N* veces la iluminancia con los métodos estandarizados. Por tanto, siempre que el número de porciones de cielo sea menor que el número de cielos (p.ej. tantos como datos horarios diurnos) que tengan que ser modelados, el empleo de los *DC* tiene el potencial de ser computacionalmente más eficiente que tratando cada cielo individualmente [110].

### Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural

La *Modelación climática de la Luz Natural (Climate Based Daylight Modelling -CBDM)* permite, por tanto, obtener *series temporales de iluminancias para cada punto de cálculo* considerado del plano de trabajo. Por lo tanto, realizando un cálculo horario, para cada punto se obtienen tantos valores de iluminancia como horas a lo largo del año, es decir 8760 valores en cada sensor, siendo la mitad de ellos, 4380 valores, de luz natural [1].

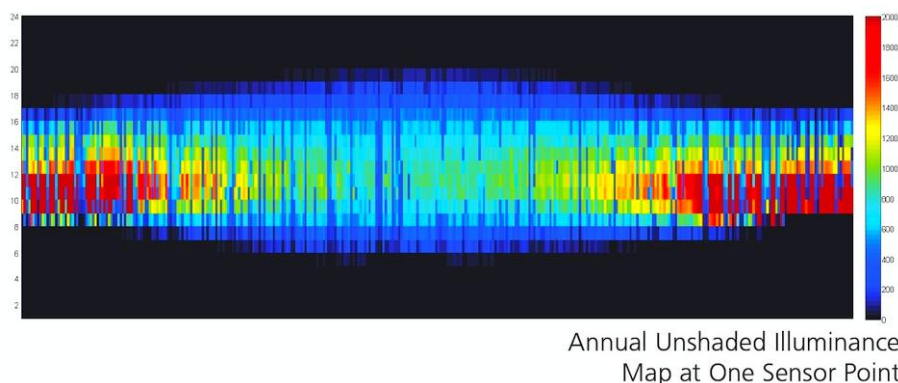


Figura 114: Mapa temporal con los valores de iluminancia (lux) en un punto a lo largo del año [84].

Los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (Dynamic Daylight Metrics -DDMs)* surgen como un medio para reducir esta gran cantidad de valores a un único valor, o un grupo determinado de valores complementarios, que reflejen las condiciones anuales de iluminación natural sin perder su valor para el diseño del edificio [1]. La ventaja de estos indicadores, comparadas con los indicadores estáticos, es que consideran la cantidad y el carácter de las variaciones estacionales y diarias de la luz natural para una localización dada, incluyendo los fenómenos meteorológicos locales [13].

Los *Indicadores dinámicos de Iluminación Natural*, por tanto, son unidades de medida obtenidos mediante el análisis y el tratamiento estadístico de la *serie temporal de iluminancia* en cada punto. Para ello es necesario definir el rango temporal sobre el que se va a realizar el análisis y es necesario definir un criterio que permita definir si las condiciones de iluminación natural de un determinado sensor se consideran adecuadas. Este criterio puede ser un nivel mínimo de



iluminación, un rango de iluminancias, la estabilidad temporal de los valores obtenidos, una cantidad de horas de exposición o el criterio que se estime conveniente [13].

El primer de los indicadores en ser desarrollados fue la *Autonomía de Luz Natural (Daylight Autonomy -DA)* en 2001 por *C. Reinhart* [120], seguida de la *Iluminancia Natural Útil (Useful Daylight Illuminance -UDI)*, desarrollada por *J. Mardaljevic* en 2005 [14]. Tras éstas se han desarrollado otros indicadores dinámicos como un medio de complementar o adaptar las anteriores a las condiciones visuales como la *Autonomía Continua y Máxima (Continuous Daylight Autonomy y Maximum Daylight Autonomy -DAcon y DAMax)* desarrollada por *Z. Rogers* [13] o al caso específico de las escuelas como el *Porcentaje de Saturación de Luz Natural (Daylight Saturation Percentage o Daylight Autonomy Factor - DSP o DAF)* definida por la *Cooperativa para las Escuelas de Alto Rendimiento (Collaborative for High Performance Schools -CHPS)* que define los estándares de diseño de las escuelas norteamericanas [124].

La proliferación de estos indicadores durante la última década ha llevado a la creación de comités específicos dentro de las grandes instituciones sobre iluminación (*IES Daylight Metrics Committee* en 2006 y *CIE Technical Committee 3-47: Climate-Based Daylight Modelling* en 2008) que trabajan para llegar al consenso y la normalización de los *DDMs* así como el establecimiento y determinación de criterios de interpretación y rango de valores aceptables.

En Enero de 2013, el comité de la *IESNA* no sólo ha consensuado el uso de las *DDMs* sino que, tras los estudios previos [125], ha definido dos indicadores dinámicos que recogen no sólo el aspecto cuantitativo sino también el confort visual. Éstas son la *Autonomía Espacial de Luz Natural y la Exposición Solar Anual (Spatial Daylight Autonomy y Annual Solar Exposure -sDA y ASE)*. Ambos indicadores están recogidos en el estándar '*IES LM-83-12*' [126].

Aunque actualmente se han propuesto diferentes indicadores dinámicos. Por su relevancia en el desarrollo de esta tesis doctoral, sólo se exponen los fundamentos de la *Autonomía de Luz Natural*, germen de los otros indicadores dinámicos, y la *Iluminancia Útil de Luz Natural*. También se exponen los fundamentos de la *Autonomía Espacial de Luz Natural* y de la *Exposición Solar Anual* por ser los primeros indicadores dinámicos reconocidos en un documento legislativo, así como por la incorporación en su propia definición de criterios de análisis de valores de dichos indicadores.

### Autonomía de Luz Natural (2001)

La *Autonomía de Luz Natural (Daylight Autonomy -DA)* fue el primero de los actualmente conocidos como *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (Dynamic Daylight Metrics -DDMs)*.

El concepto de *Autonomía de Luz Natural* fue definido por primera vez por la *Asociación Suiza de Electricistas (Association Suisse des Electriciens)* en 1989 siendo "*el porcentaje del año en que se obtiene un valor mínimo de iluminación debido exclusivamente a la luz natural*". En su concepción original, este término era función del *Factor de Iluminación Natural* y de un mínimo nivel de iluminación.

En 2001 *C. Reinhart* y *O. Walkenhorst* redefinieron la *DA* para un punto en un edificio como "*una cantidad física útil que representa el porcentaje de un intervalo de tiempo considerado durante el cual se puede mantener un nivel mínimo de iluminación sólo con luz natural*" [120].

La *Autonomía de Luz Natural* utiliza, por tanto, los valores de iluminancia en el plano de trabajo como indicativo. Para su determinación se requiere de la definición de un nivel de iluminancia mínimo que se necesita para el desarrollo de una determinada tarea visual y un *rango temporal* sobre el que realizar el análisis de la serie temporal de iluminancia que recibe cada punto.

Para la definición del intervalo de tiempo se plantean dos opciones diferentes: considerar todas las horas diurnas a lo largo del año o bien considerar las horas diurnas en el que el espacio está ocupado. *C. Reinhart* y *O. Walkenhorst* finalmente optaron por establecer como *rango temporal* el periodo de ocupación del espacio, es decir, el rango temporal en que las personas necesitan unos determinados niveles de iluminación para el desarrollo de las tareas visuales. De esta forma, la *Autonomía de Luz Natural* indica la frecuencia en que no es necesario el uso de iluminación artificial para el desarrollo de una tarea visual [120].

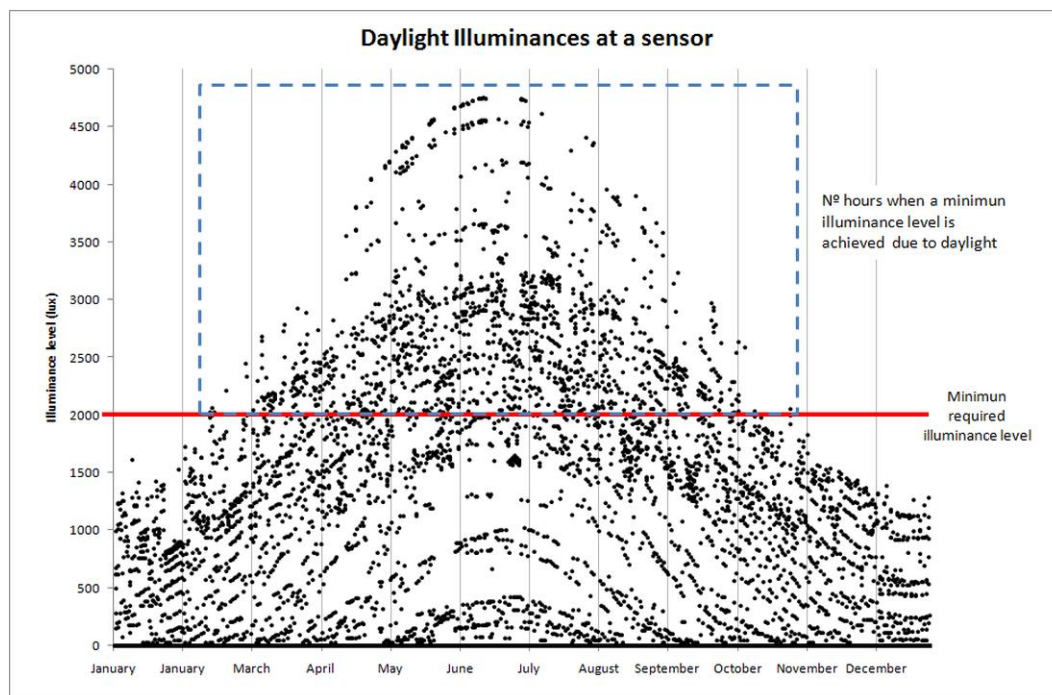


Figura 115: Iluminancias en un punto. Concepto de *Autonomía de Luz Natural*. P.M. Esquivias

En publicaciones posteriores el concepto de *DA* se ha renovado y complementado incluyendo otros factores como el comportamiento del usuario frente al uso de las persianas, en base a los algoritmos desarrollados por *G.R. Newsham* [92] y revisados posteriormente por *C. Reinhart* [127]. La *Autonomía de Luz Natural* finalmente depende de los requerimientos de niveles de iluminación de los usuarios, de las horas de ocupación y del estado en que se encuentran los elementos de protección solar a lo largo del año [84], por lo que tiene el poder de mostrar el potencial de ahorro energético en iluminación eléctrica si los usuarios realmente apagan la luz artificial cuando se obtiene el nivel deseado de iluminación con luz natural.

Por otro lado, el uso de los patrones de ocupación está ampliamente extendido y normalizado en las simulaciones energéticas, por lo que el perfil resultante de la interacción entre la iluminación natural y artificial puede incorporarse a los programas de *simulación energética* para calcular el consumo de iluminación con mayor precisión.

### Iluminancia Natural Útil (2005)

La *Iluminancia Natural Útil (Useful Daylight Illuminance -UDI)*, propuesto por *A. Nabil* y *J. Mardaljevic* en 2005 [14], fue el segundo de los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural* en definirse. También parte del análisis de la iluminancia que recibe cada punto del plano de trabajo [128].

Debido a la presencia de la luz directa solar en el plano de trabajo es habitual encontrar rangos de iluminación de gran amplitud, por lo que es imposible aplicar los conceptos de uniformidad que

se aplicaban con el concepto de *Factor de Iluminación Natural*. Cualquier métrica que se base en las condiciones reales meteorológicas debe adaptarse, por tanto, a la amplitud de niveles de iluminación que se puede encontrar en el plano de trabajo. En este sentido *J. Mardaljevic* y *A. Nabil* proponen abandonar el concepto de un único nivel de iluminación como objetivo y determinar en su lugar la existencia de un rango de niveles de iluminación que se puedan considerar «útiles» [14].

Si el nivel de iluminación es muy bajo, éste no será útil ni para la percepción del entorno visual ni para llevar a cabo tareas visuales. Del mismo modo, si el nivel de iluminación es demasiado elevado, puede producir problemas de confort visual o térmico, o ambos, debido a la aparición de problemas de deslumbramiento y de sobrecalentamiento del espacio. Una excesiva iluminación provocará que el usuario tome medidas de protección frente a la entrada de luz. Los niveles de iluminación que no son ni muy elevados ni demasiado bajos son niveles de iluminación «útiles».

Para determinar los límites superior e inferior del rango de iluminancias útiles los autores realizaron un estudio de los trabajos publicados sobre las preferencias y comportamiento según el nivel de iluminación de los usuarios de los espacios de oficina. Dentro de estos trabajos cabe destacarse el proyecto de investigación internacional *Cost-Effective Open-Plan Environment (COPE)* liderado por el *Instituto para la Investigación en la Construcción del Consejo Nacional de Investigación de Canadá (Institute for Research Construction-National Research Council Canada - IRC-NRC)* [129], los trabajos de *S. Selkowitz* [130] o las recomendaciones de *P. Littlefair* [5] [131] desde el *Centro Británico de Investigación de la Edificación (BRE)*.

En base a estos estudios, que determinaron los niveles de iluminación mínimo y máximo de confort para la realización de tareas visuales, se define el indicador *UDI*, que se compone de una terna de valores que representan el porcentaje del tiempo en que el espacio está ocupado en que se obtiene una iluminancia entre 100 lux y 2000 lux; es decir, una iluminancia útil para el usuario; una iluminancia por debajo de 100 lux y una iluminancia por encima de 2000 lux [128].

Actualmente sigue abierto el debate sobre la idoneidad de 2000 lux como límite superior del rango útil de niveles de iluminación, por lo que nos encontraremos con diferentes publicaciones donde este límite superior se establece en 2500 lux o 3000 lux [1] [132]. Tal como afirma *J. Mardaljevic*<sup>5</sup>, a medida que la comunidad científica tenga más información sobre la aparición y las condiciones del deslumbramiento se irá precisando este límite. Del mismo modo en que a medida que se sepa más sobre el rendimiento visual del ojo humano se irán modificando los niveles de iluminación necesarios para el desarrollo de las tareas visuales [96].

En las últimas publicaciones, donde parece que se ha establecido el límite superior de 3000 lux, no sólo se definen tres rangos de iluminancia útil, sino que el rango central se subdivide en dos [1] [132]:

1. Iluminancias por debajo de 100 lux se consideran generalmente insuficientes para ser una única fuente de iluminación o para contribuir de forma significativa a la iluminación artificial (*UDI feel short* o *UDI-f*).
2. Las iluminancias entre 100 lux y 3000 lux se consideran las iluminancias útiles. La luz natural puede ser la una única fuente de iluminación o en combinación con la iluminación artificial (*UDI combined* o *UDI-c*). Se divide en dos sub-categorías:

---

<sup>5</sup>Conversaciones mantenidas sobre la naturaleza de los *indicadores dinámicos de iluminación natural* durante mi estancia breve en *DeMonfort University* (Leicester -UK) donde era profesor en primavera de 2012 [25].

- 2.1. Las iluminancias entre 100 lux y 300 lux se consideran iluminancias suplementarias (*UDI supplementary o UDI-s*). Estos niveles de iluminación pueden necesitar una iluminación artificial que suplemente la iluminación natural para el desarrollo de las tareas visuales comunes.
- 2.2. Las iluminancias entre 300 lux y 3000 lux se consideran iluminancias autónomas (*UDI autonomous o UDI-a*). Con estas iluminancias apenas es necesaria la iluminación artificial
3. Iluminancias mayores de 3000 lux pueden ser la causa probable de problemas de confort visual o térmico, o ambos. Se consideran iluminancias excesivas (*UDI excessive o UDI-e*).

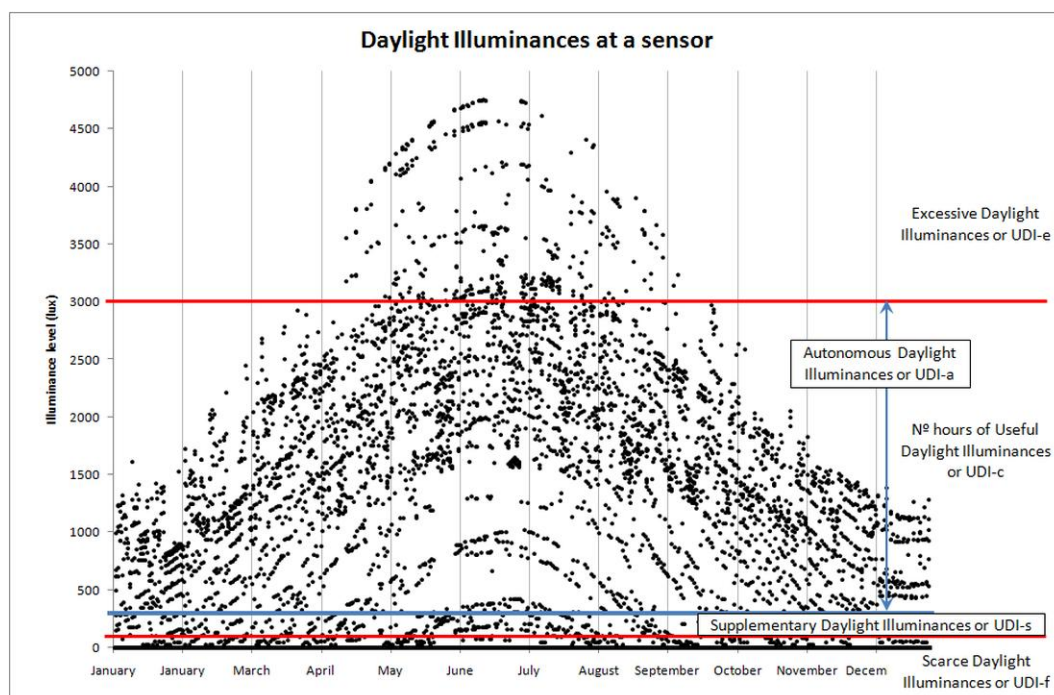


Figura 116: Iluminancias en un punto. Concepto de *Iluminancia Natural Útil*. P.M. Esquivias.

En realidad, el valor de *DA* para una iluminancia de 300 lux es muy similar al valor de *UDI-a*, solo que el concepto de *UDI* segrega las iluminancias que exceden un límite superior de iluminancia, ya establecido en 3000 lux. Expresado de otro modo:

$$DA_{300} = UDI_a + UDI_e$$

Ecuación 18: Relación entre *UDI* y *DA* [132].

Este indicador no sólo aporta información sobre la distribución del rango de iluminancias, sino también la propensión a tener niveles excesivos que están asociados con el *deslumbramiento*, el *disconfort de los ocupantes* y *ganancias solares no deseadas* [128]. El principal propósito del indicador *UDI* es permitir la comparación de diferentes opciones de diseño en base a la porción de iluminancias útiles que son capaces de proporcionar.

Su mayor innovación, por tanto, es la incorporación del rendimiento visual de los usuarios para establecer los límites del rango útil, de forma que se clasifican en tres grupos los valores absolutos de la iluminancia debida a la luz natural que recibe en un punto considerando sus variaciones a lo largo del año en base a las condiciones meteorológicas locales.

### Autonomía Espacial de Luz Natural y Exposición Solar Anual (2013)

El proyecto de investigación '*Daylight metrics*' [125] financiado por la *Comisión de Energía de California*, coordinado por *L. Heschong* y guiado por el comité de la *IESNA* sobre *Indicadores de Iluminación Natural (IES Daylight Metrics Committee)*, tenía como objetivo el desarrollo de un conjunto de indicadores del comportamiento dinámico de la luz natural. Realizado en cooperación con investigadores de renombre nacional e internacional, proporciona criterios de evaluación de los indicadores para que puedan ser incorporadas a las especificaciones de los edificios, programas de simulación, códigos y estándares para fomentar una mejor iluminación natural de los edificios, y como consecuencia reducir la demanda energética y con ello el consumo energético.

En base a las conclusiones de este trabajo de investigación, el comité publicó el estándar '*IES LM-83-12*' [126]. Durante el proceso de desarrollo de los nuevos indicadores dinámicos de iluminación natural, se revisaron y estudiaron los indicadores existentes. Partiendo de la base de que una sola métrica era incapaz de reflejar toda la complejidad de la iluminación natural, desarrollaron dos indicadores que permitieran analizar un espacio a lo largo del año en base a la suficiencia de luz natural y al peligro potencial de excesiva penetración solar en el espacio.

La primera métrica corresponde a la *Autonomía Espacial de Luz Natural (Spatial Daylight Autonomy -sDA)* que se define como "*el porcentaje del área de análisis (el área donde se realizan los cálculos -normalmente a lo largo de todo el espacio) que alcanza un nivel mínimo de iluminación natural de 300 lux durante el 50% de las horas operativas anuales*". Esta métrica, como se puede ver, toma como base el concepto de *Autonomía de Luz Natural*, pero para su cálculo se fija el nivel mínimo de iluminación así como el rango temporal sobre el que cumplir unos determinados valores mínimos. Para considerar un espacio iluminado naturalmente se ha de cumplir con un mínimo porcentaje de la superficie con una Autonomía  $DA_{300}$  del 50%.

Al determinar el porcentaje del área de análisis que cumple con el requisito de nivel mínimo de iluminación y de horas mínimas operativas se obtiene un único valor para toda el área de análisis en vez de un valor para cada punto; sin embargo, tal como se ha descrito anteriormente, al obtener este valor del análisis punto a punto del área de análisis no se está considerando dicha área como un elemento unitario sino como la suma asíncrona de diferentes situaciones.

La segunda métrica es la *Exposición Solar Anual (Annual Solar Exposure -ASE)* que proporciona información sobre la presencia luz solar directa como fuente potencial de *discomfort visual*. La *Exposición Solar Anual* se define como "*el porcentaje del plano de trabajo que recibe más de 250 horas de luz solar directa*".

La luz solar directa que se considera es la debida sólo a la *radiación solar directa* considerando las condiciones climáticas locales, las obstrucciones exteriores, la transmisividad de los acristalamientos y las sombras que arrojan el mobiliario y las particiones interiores, pero sin la presencia de elementos de protección solar.

Estudios de campo realizados por *L. Heschong* [125] determinan que la diferencia entre las mediciones en puntos a la sombra y puntos soleados es de 1000 lux. Debido a esta diferencia se redefine la *Exposición Solar Anual* como "*el número máximo de horas al año que cada sensor del plano de trabajo recibe luz solar directa o una iluminancia mayor de 1000 lux*".

La *Exposición Solar Anual* parece ser heredera de la antigua métrica conocida como *Exposición Anual a la Luz (Annual Light Exposure -ALE)* que era un indicador expresamente creado para controlar la cantidad de *radiación en rango visible* que incide sobre un punto sensible a la luz, como las obras de arte, a lo largo de un año. Este indicador está asociado, por tanto, a espacios expositivos, museísticos o que contengan obras de arte sensibles a la fotoexposición y está regulado

por el estándar '*CIE 157-2004: Control del Daño provocado por la Radiación Óptica a los Objetos Museísticos*'.

En el contexto actual, mientras los indicadores *DA*, *UDI* y *sDA*, están llamados a sustituir al *Factor de Iluminación Natural*, la *Exposición Solar Anual* surge con la vocación de tener un equivalente de los estudios de las *horas de soleamiento* realizados con la ayuda de las diferentes cartas solares con el mismo formato que los nuevos indicadores.

Ambos indicadores utilizan la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)* para obtener las *series temporales de iluminancia*, en un *rango temporal* determinado, cuyos valores son tratados estadísticamente en cada punto del área de análisis. Ambos forman una pareja que proporciona en una primera instancia información que permite entender cómo un espacio existente o en fase de proyecto se espera que se comporte, permitiendo una primera evaluación del diseño de la iluminación natural, aunque no abarcan otros aspectos como la uniformidad, el contraste, el deslumbramiento o su efecto en la salud humana o su impacto en el consumo energético del edificio.

### 2.2.3 Radiación solar térmica a través de los huecos

Si bien los estudios de soleamiento permiten conocer las *horas de incidencia de radiación solar directa* en cada punto de estudio dentro de un espacio, no consideran la intensidad de la misma, que varía a lo largo del año en base a la variación de la distancia de la Tierra al Sol definida por la órbita elíptica de traslación, así como debido a la declinación de la Tierra [101].

La consideración de las horas de soleamiento no sólo permite realizar un análisis sobre los momentos a lo largo del año en que un punto «ve» el Sol, complementando los análisis de iluminación natural, sino que, incorporándole los valores correspondientes de intensidad, es uno de los factores que intervienen en el análisis de las cargas térmicas de los edificios.

Esta intensidad de la radiación, tal como se ha visto anteriormente, puede ser especialmente elevada, por lo que la *radiación solar térmica directa* que atraviesa los huecos puede ser un elemento clave en las condiciones térmicas de los edificios [69].

En general, la transferencia global de energía a través de una ventana es el efecto combinado de tres tipos diferentes de transporte de energía: Transmisión de calor, *Radiación Solar* (cuya porción emitida en el espectro visible corresponde con la luz natural) y Ventilación.

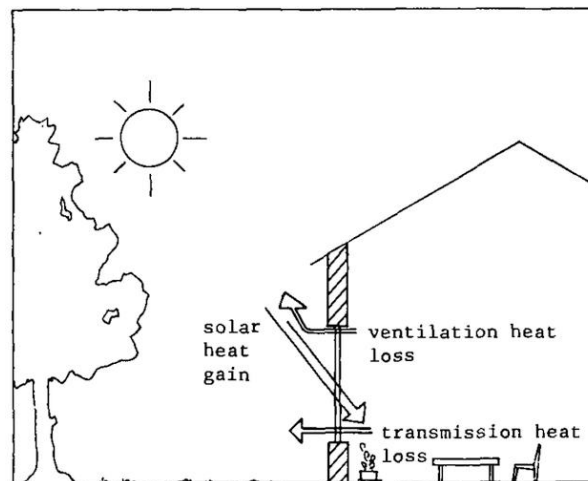


Figura 117: Transferencia de calor a través de una ventana [69].

La transmisión de calor es el nombre genérico de cualquier combinación de tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación térmica [133] [134]. Esta transferencia, debido a una diferencia de temperatura en las diferentes regiones de estudio, se mueve desde la región con mayor temperatura hacia la región de menor temperatura [69] [135] [136]:

1. **Conducción:** transferencia de calor que se produce a través de un elemento sólido cuando existe un gradiente de temperatura, caracterizada por la conductividad térmica del material.
2. **Convección:** transferencia de calor que se produce entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas, expresada de forma simplificada mediante los coeficientes de convección del fluido.
3. **Radiación térmica:** propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas. El intercambio radiante entre un elemento y los elementos de su entorno se diferencia según dos grupos de *longitud de onda electromagnética ( $\lambda$ )*.
  - 3.1. Onda larga (>2500 nm) que corresponde con el inicio del rango infrarrojo lejano

3.2. Onda corta (<2500 nm) que incluye los rangos infrarrojo cercano, visible y ultravioleta.

De forma simplificada, los intercambios radiantes vienen determinados por las características de *emitancia* ( $\epsilon$ ), *absortancia* ( $\alpha$ ), *transmitancia* ( $\tau$ ) y *reflectancia* ( $\rho$ ) de los materiales en las diferentes *longitudes de onda* y el ángulo de incidencia [69] [135] [136].

Para evaluar el intercambio radiante entre una ventana y las superficies interiores de una habitación, como supone una gran complejidad, se asumen las siguientes simplificaciones [69]:

- Todas las superficies son grises, por lo que las propiedades de los materiales son independientes de la longitud de onda
- Cada superficie difunde isotrópicamente la radiación infrarroja
- La temperatura de cada superficie es uniforme salvo la superficie interior de la ventana
- La energía incidente sobre cada superficie es uniforme

Al considerar los cuerpos como superficies grises, se asume que la *emitancia* y la *absortancia* son iguales ( $\alpha = \epsilon$ ), por lo que la energía emitida por los elementos del entorno al llegar a un cuerpo, en parte se absorbe, otra parte se transmite y el resto se refleja, siendo la suma de esta terna de valores igual a la unidad. Aunque son independientes de la longitud de onda, los materiales se caracterizan por su comportamiento a onda corta y a onda larga, dando lugar a dos ternas de valores. Estos coeficientes determinan como se produce la transferencia de luz y de calor a través de un material.

A diferencia de la radiación térmica, la *radiación solar global* que llega a la superficie exterior de la envolvente térmica es la *radiación directa* procedente del Sol más la *radiación difusa* procedente del cielo y la *radiación reflejada* del entorno. Evidentemente, la cantidad de radiación solar que incide en una ventana depende de las condiciones climáticas, la altura solar, la orientación y la inclinación de la ventana. Esta radiación se refleja y absorbe parcialmente, el resto se transmite a través de la ventana y alcanza las superficies interiores de la habitación como radiación en onda corta (conocida como transmisión directa o primaria).

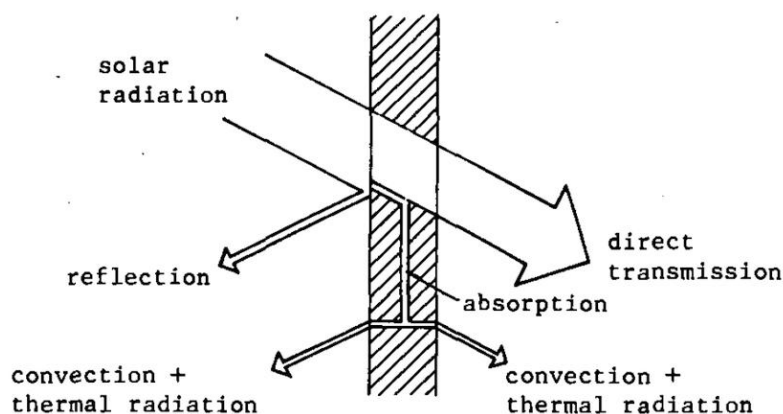


Figura 118: Radiación solar sobre una ventana: transferencias [69].

Esta *radiación directa* abarca desde las regiones ultravioleta y visible hasta la región infrarroja cercana del espectro electromagnético, caracterizando a los materiales mediante su *transmitancia ultravioleta* ( $\tau_{uv}$ ), su *transmitancia visible* ( $\tau_{vis}$ ), su *transmisión total de la energía solar* ( $\tau_{sol,tot}$ ). Esta energía solar transmitida puede dividirse entre la que se transmite directamente (*transmisión directa* -  $\tau_{sol,dir}$ ), que es comparable con la transmitancia visible, y la *ganancia térmica* debido a la transmisión secundaria (proceso de absorción y reemisión). Es decir, la energía absorbida por la



ventana se transmite por ambas caras hacia el ambiente interior y exterior mediante los mecanismos de convección y *radiación térmica* [134].

La *transmisión total de la energía solar* a través de la ventana ( $\tau_{sol, tot}$ ) se describe mediante el *Coefficiente de Transmisión Total de Energía Solar*, también conocido como *Factor Solar ( $g_L$ )* o *Coefficiente de Ganancias Solares (Solar Heat Gains Coefficient -SHGC)* [133], que se define como la relación entre el calor solar total (primaria más secundaria) que entra a través de la ventana y la radiación solar incidente en el exterior de la misma [69], o, dicho de otro modo “*cociente entre la radiación solar a incidencia normal que se introduce en el edificio a través del acristalamiento y la que se introduciría si el acristalamiento se sustituyese por un hueco perfectamente transparente. Se refiere exclusivamente a la parte semitransparente de un hueco*” [137]. El valor de SHGC normalmente suele ser ligeramente más bajo que su correspondiente *transmitancia visible* [134].

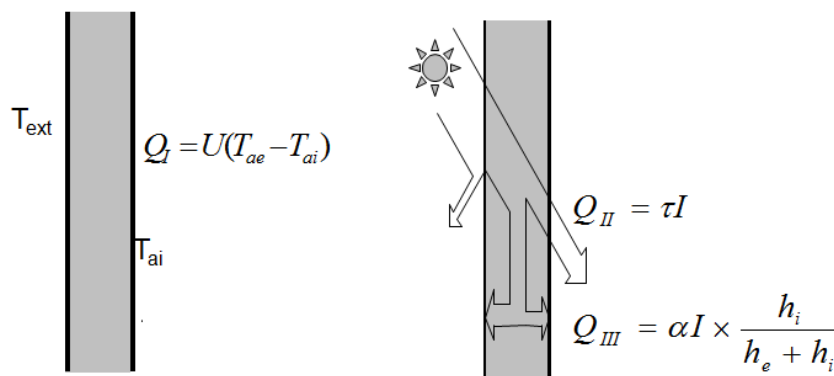


Figura 119: Mecanismos de transferencia de calor en un elemento no opaco.

Bajo las hipótesis de partida que simplifican la formulación de la ecuación de transferencia, el flujo de energía ( $Q$ ) a través de los elementos semitransparentes (huecos, ventanas y lucernarios) se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q = A_s [ U(T_{ext} - T_{int}) + (\alpha I \times h_i / (h_e + h_i)) + \tau I ] = A_s U(T_{ext} - T_{int}) + A_s I (SHGC)$$

Ecuación 19: Flujo de calor a través de un elemento semitransparente [135].

Donde:

- $A_s$  es la superficie del elemento normal al flujo de calor ( $m^2$ );
- $U$  es la transmitancia térmica ( $W/m^2K$ );
- $T_{ext}$  es la temperatura de las condiciones exteriores;
- $T_{int}$  es la temperatura de las condiciones interiores;
- $\alpha$  es el *coeficiente de absorción o absorptancia*;
- $I$  es la *radiación solar global incidente* ( $W/m^2$ );
- $h$  es el coeficiente de convección o coeficiente de película, interior (i) y exterior (e);
- $\tau$  es el *coeficiente de transmisividad solar* del elemento semitransparente.
- *SHGC* es el *Coefficiente de Ganancias Solares* o *Factor Solar* del elemento semitransparente

El primer término corresponde con la transferencia de calor a través del elemento sin la presencia de soleamiento, infiltraciones de aire y condensación de humedad. Considera la conductividad del material y el coeficiente de convección de la película de fluido que entra en contacto con el elemento tanto en el interior como en el exterior.

El segundo término depende de la superficie del elemento ( $A_s$ ), la *radiación solar global incidente (I)* y del *Coefficiente de Ganancias Solares (SHGC)*. Este término tiene dos componentes: El primero es la radiación solar transmitida directamente, que se caracteriza por la *transmisividad solar* del hueco. Este sumando es, a grandes rasgos, el aspecto que se representa en los diagramas solares cuando se realiza el estudio de soleamiento. El segundo componente es la porción de radiación solar absorbida, una parte de la cual será transmitida posteriormente al interior por convección y/o radiación térmica [69] [133] [135].

Para la determinación del calor que fluye a través de un elemento semitransparente se calcula de forma separada:

1. El flujo de calor debido a la acción de la *radiación solar directa* sobre dicho elemento, que corresponde con el efecto térmico de la *componente directa de la iluminación natural* (transmisión primaria).
2. El flujo de calor por la combinación de la conducción y la convección (transmisión secundaria), en la que se asume un régimen permanente de transferencia.

Mientras el estudio de soleamiento arroja resultados de carácter puntual, el cálculo de la radiación solar directa implica un valor que afecta a un volumen de aire contenido en una envolvente. El diagrama solar, pese a su carácter puntual, ofrece información anual, aunque gráfica. En el análisis térmico lo habitual es la integración a lo largo del año de las diferentes ecuaciones que definen los diferentes mecanismos de transferencia de calor; para ello es necesario el uso de programas informáticos que realicen dichos cálculos considerando los parámetros del edificio estudiado, así como las condiciones exteriores locales, definidas por su archivo climático.

En el ámbito de los programas de *simulación energética*, que trataremos a continuación, en el motor de cálculo *EnergyPlus* (2001) [89] se combina el *Modelo de Cielo General Estándar CIE* [87] de *Perez* con los algoritmos de *radiosidad* y las *series temporales radiantes* para calcular la *radiación solar incidente* en los diferentes elementos del modelo de simulación, de forma que se obtiene la *radiación solar directa* que atraviesa el acristalamiento de una ventana y que incide en el espacio.

## 2.2.4 Cálculo computacional

Desde 1960 se han realizado múltiples estudios en todo el mundo para desarrollar métodos o algoritmos de cálculo para poder predecir los diferentes fenómenos involucrados en las transferencias de luz y calor de los edificios [138]. La aparición de los ordenadores y de la crisis energética de la década de 1970, promovieron la aplicación de las técnicas computacionales a los métodos desarrollados dando lugar al desarrollo de una gran cantidad de programas de simulación, principalmente en Norte América y Europa [100] [139].

Los requerimientos actuales sobre el consumo energético de los edificios y la necesidad de evaluar la incorporación de estrategias de reducción de la demanda térmica, así como de iluminación natural y de control del soleamiento, hacen cada vez más necesario tener en cuenta los diversos procesos dinámicos que intervienen en la relación de los edificios con sus condiciones exteriores, así como su influencia en la salud y el bienestar de los ocupantes de los mismos [109].

Los *modelos matemáticos computacionales* que describen estos procesos, basados en *principios físicos fundamentales*, son de naturaleza tan compleja que sólo pueden resolverse mediante un ordenador. Es decir, la diferencia fundamental entre las simulaciones por ordenador y cualquier otro cálculo reside principalmente en la complejidad.

Estos modelos computacionales, conocidos como *programas de simulación*, emulan la interacción dinámica del calor, la luz, la masa (de aire y de humedad) y el sonido en un edificio para predecir su comportamiento ambiental debido a su exposición a las condiciones climáticas, la interacción de los usuarios y los sistemas activos de acondicionamiento [109] [136] [139] [140]. Su proceso de cálculo se basa en la resolución ordenada de numerosas y complejas ecuaciones que, cuando se combinan, describen cómo se comporta el edificio, con una mayor precisión que cualquier método manual, guía de diseño o regla de oro, desplazándolos a un segundo plano o al abandono [141].

Conocidos y establecidos los fundamentos físicos y las ecuaciones que describen el flujo de luz y calor en los edificios, los *algoritmos y métodos de cálculo* establecen los procedimientos que se van a seguir para la resolución de las mismas; es decir, establecen los protocolos y pasos a seguir, incluyendo también las hipótesis de partida o simplificaciones consideradas para la resolución de estas ecuaciones a favor de un menor tiempo de computación o en función de la capacidad de cálculo determinada por la tecnología disponible.

Cada disciplina tiene sus propias ecuaciones que describen los procesos de transferencia, de forma que, generalmente, los modelos y los programas de simulación han seguido un desarrollo paralelo, es el caso de la simulación de iluminación natural y el cálculo de la radiación solar térmica que entra a través de los huecos de un edificio.

La *simulación de iluminación natural* calcula cantidades físicas como la *iluminancia (E)* o la *luminancia (L)* debidas a la luz natural que entra en un determinado edificio ubicado en una determinada localización. Tal como expresa *J. Mardaljevic*: “*Se entiende como simulación de iluminación natural a un cálculo computarizado que permite predecir la cantidad de luz natural que entra en un edificio ya sea considerando sólo determinadas condiciones de cielo (simulaciones estáticas), o considerando las condiciones de Sol y cielo que se derivan de bases de datos meteorológicas estandarizadas (simulaciones basadas en el clima)*” [1].

La componente térmica de la luz natural viene integrada normalmente en los cálculos realizados en la *simulación energética*. “*Una simulación energética es un cálculo computacional que ayuda a predecir las interacciones entre una zona térmica con el entorno que le rodea, con otras zonas*

*térmicas y con los sistemas de climatización e iluminación considerando las condiciones climáticas del entorno, las propiedades físicas térmicas de los elementos de su envolvente, las características y horarios de funcionamiento de las zonas y las características y comportamiento de los diferentes sistemas” [136] [140].*

Aunque las primeras herramientas de simulación se desarrollaron en los años 70, ha sido en los últimos veinte años cuando realmente se ha expandido su uso, integrándose progresivamente en los procesos de diseño de los edificios [51] [142] [97] [143] [144]. Para adaptarse a las nuevas necesidades y a los avances en el conocimiento, los programas de simulación están en continua evolución, algunos de ellos caen en desuso y otros los sustituyen o bien actualizan sus algoritmos de cálculo para dar resultados más precisos [145]. De esta forma, y debido a la gran presencia de herramientas de cálculo de cada aspecto específico de la edificación, las herramientas de simulación también están evolucionando para reunirse en plataformas comunes en lo que se conoce como herramientas integradoras.

En un principio, la simulación ha sido un proceso desligado de la fase de diseño de los edificios, y su creciente interés en el uso de simulaciones informáticas está muy relacionado con el cumplimiento de la normativa edificatoria [143] [146] [147], con el establecimiento de la simulación como medio para cumplir con las cada vez mayores exigencias normativas, o como requisito para la obtención de incentivos, así como los sistemas de certificación ambiental internacional, como *LEED (Leadership in Energy & Environmental Design)* [18] o *BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)* [19], en los que se requieren de unos resultados para su justificación que sólo pueden ser obtenidos mediante simulación informática [109] [136] [141].

El uso de simulaciones térmicas o lumínicas en la práctica profesional del diseño arquitectónico no está demasiado expandido [148] y su aplicación normalmente se restringe a las fases finales [109] [149], aunque cada vez más se aborda la simulación en las primeras etapas [142] [150]. Si se integra la simulación en las fases iniciales del proyecto, se pueden simular diferentes soluciones formales que proporcionen las condiciones térmicas y lumínicas más apropiadas, especialmente si afectan a aspectos difícilmente modificables a posteriori [151] [152] [153] [154]. Sin embargo, se está produciendo un cambio de tendencia, de forma que la simulación del comportamiento ambiental del edificio ha dejado de ser una herramienta de análisis para convertirse en una herramienta de diseño, en lo que se conoce actualmente como «*diseño paramétrico*» [144] [155] [156].

El uso de las herramientas de simulación, por tanto, ha sufrido una gran evolución. En 1994 casi el 77% de las personas encuestadas utilizaban tanto los modelos a escala como los modelos computacionales para su práctica profesional en iluminación, sin embargo en una encuesta realizada en 1996 sobre simulación energética resultó que todos los participantes utilizaban programas de simulación térmicos para su práctica profesional [157]. La encuesta realizada en 2002 a arquitectos austriacos reveló, sin embargo, que sólo el 16,7% utilizaba programas de simulación y que sólo en el 30% de los casos se les pide una simulación energética como parte de su trabajo [158]. También *Reinhart y Fitz* [108], tras realizar una encuesta sobre el uso de herramientas de simulación en 2004, señalan que el porcentaje de profesionales que no utilizaban ningún tipo de programa de predicción de iluminación natural era tan sólo del 21%. Este porcentaje sin embargo se ha ido reduciendo cada vez más, ya que los estudiantes de arquitectura e ingeniería se familiarizan con el uso de modelos informáticos durante su periodo de formación [97].

Ante la gran diversidad de herramientas que se encuentra el usuario es imprescindible verificar que los resultados que proporcionan se corresponden con resultados contrastados. Los trabajos de comparación y validación de programas de simulación se pueden dividir en dos grupos fundamentales: aquellos que comparan los resultados de la simulación con una realidad construida,

ya sea un modelo a escala o real, y los que comparan los resultados bajo situaciones controladas teóricas o de laboratorio [97] [145] [159]. Sin embargo, la diversidad de experimentos de uno u otro tipo hacen difícil la comparación de los resultados parciales.

Para facilitar la comparación de los programas, las instituciones internacionales correspondientes han desarrollado métodos estandarizados de validación de programas en base a la resolución analítica de las ecuaciones que describen los diferentes procesos involucrados en la simulación [97] [99] [160] [161]. En el caso de los programas de simulación de iluminación, la validación se rige mediante los casos de prueba publicados por la *CIE*, conocidos como *CIE Test Cases* [99]. En el caso de los programas de simulación energética, la *IEA* publicó el procedimiento a seguir, conocido como *BESTEST* [98], también recogido por la *ASHRAE* mediante el '*ASHRAE Standard 140*' [162].

Mientras que los informes de validación de la precisión de los programas son realizados por expertos en la materia [68] [141], los usuarios que empiezan a trabajar con los programas de simulación suelen ser autodidactas y no suelen ser expertos en los aspectos del comportamiento del edificio a estudiar [160], por lo que confían en que los resultados que ofrecen los programas al introducir los parámetros de cálculo por defecto no varían drásticamente de los que obtendrían los usuarios expertos. Sin embargo, varios estudios han demostrado que se pueden encontrar grandes discrepancias [141] [161].

El papel, por tanto, del usuario de estos programas es fundamental a la hora de realizar las simulaciones [163]. Sea cual sea el grado de especialización en el manejo de la gran cantidad de programas de simulación existentes en el panorama internacional y de la variedad en los resultados que ofrecen estos programas, se requiere de una importante experiencia y conocimiento de la materia para interpretar y explicar los resultados [1] [97] [108] [109] [136] [164]. De hecho, incluso cuando se utilicen modelos computacionales adecuados por personas expertas en el manejo de dichas herramientas, todas las predicciones están sujetas a imprecisiones e incertidumbres, especialmente cuando entran en juego las variaciones de aspectos como las condiciones climáticas actuales [165].

#### 2.2.4.1 Simulación de iluminación natural

---

En los años 70, la infografía, o gráfica computacional, experimentó un gran avance dando resultados muy destacables en los años 80. Los investigadores desarrollaron métodos computacionales que mejoraban el cálculo y representación de la iluminación de cualquier tipo de volumen. Estos métodos se basaban en el transporte de la luz y de las propiedades de los materiales, dando resultados numéricos o imágenes parecidas a la realidad. Algunas aplicaciones de estas mejoras se encuentran en la cinematografía, la representación arquitectónica y la investigación de la iluminación.

Aunque las limitaciones de los primeros programas se han ido resolviendo por los modelos contemporáneos, la formulación de algoritmos eficientes de cálculo para resolver el problema de la iluminación global es un campo de trabajo en continua evolución.

Los modelos físicos modernos que explican el transporte de la luz en cualquier medio (como la óptica cuántica) son demasiado complejos para el cálculo computacional y la generación de imágenes, por lo que se utilizan modelos simplificados de la óptica geométrica y la conservación de la energía, de las que se conocen sus fórmulas físicas. Estas simplificaciones son la principal causa de las diferencias entre los modelos calculados y las mediciones reales. De hecho, la *CIE* acepta ciertos márgenes de error, siendo del 10% para la media de los cálculos de iluminancia y del 20% para valores puntuales medidos.

La simulación de la iluminación todavía puede dividirse en dos grandes áreas: la *representación fotorealista* y la visualización física (conocida como *representación predictiva*). La primera está relacionada con la producción de imágenes artísticas, mientras que la segunda afronta con precisión la representación y la predicción de la realidad bajo determinadas condiciones, siguiendo las leyes físicas, expresadas mediante algoritmos de cálculo [1] [97] [166].

Los algoritmos de cálculo de iluminación son una secuencia finita y precisa de instrucciones que se aplican en las simulaciones para resolver problemas de distribución de la luz para combinar de forma efectiva las diferentes fórmulas físicas.

Aunque existen una gran cantidad de programas en uso, los algoritmos de cálculo que utilizan se concentran en unos pocos. Éstos se pueden clasificar en tres tipos: *cálculos directos*, *algoritmos dependientes del punto de vista* y *algoritmos dependientes de la escena*. Actualmente, los más utilizados son el *trazado de rayos (raytracing)* y la *radiosidad (radiosity)* [167], aunque se han desarrollado otros algoritmos, conocidos como *enfoques integrales* (como el *mapeado de fotones o photon map*) [68] [97] [108] [145].

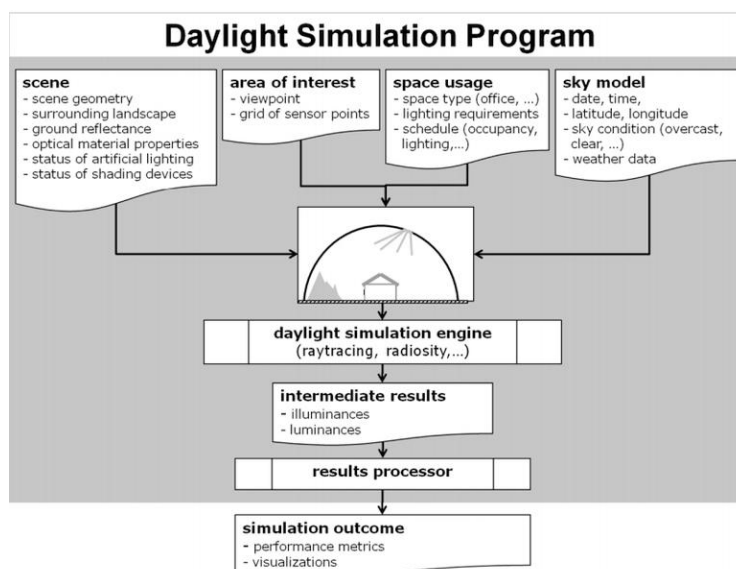


Figura 120: Esquema de un programa de simulación de luz natural [84].

### Cálculos directos

Los cálculos directos se utilizan para determinar la iluminación directamente de fuentes de iluminación. Estas fuentes pueden ser el Sol, las aperturas de iluminación natural (con la suma total del Sol y la contribución del cielo) o luminarias. Generalmente se utilizan para el cálculo y diseño de luminarias, así como para el predimensionado de sistemas de iluminación, como el *método lumen*, donde se aplican simplificaciones y fórmulas físicas muy específicas [97].

Entre los métodos de cálculo directo, y debido a su gran aplicación en programas informáticos, cabe mencionar el *método del flujo dividido (Split Flux Method)*, que es una versión geométrica del método del flujo dividido de BRE. Este método calcula el *Factor de Iluminación Natural* de un punto como la suma de las componentes directa y reflejada, exterior e interior, de la luz natural. Cada componente se calcula de forma separada y luego se suman para obtener la iluminación global en el punto de cálculo [68] [105].

Este método distribuye toda la luz incidente en una ventana en dos direcciones, donde el flujo luminoso hacia arriba y hacia debajo de la ventana se divide en dos componentes. Cada uno de estos componentes se refleja en base a la reflectancia media ponderada de las superficies sobre y

bajo la ventana. Este tipo de cálculo funciona mejor en habitaciones donde la proporción entre el ancho, la profundidad y la altura es de 1:1:1, situación que apenas se encuentra en la realidad, por lo que los cálculos con este método normalmente dan lugar a resultados de importante imprecisión [136].

### Algoritmos dependientes del punto de vista

Los algoritmos dependientes del punto de vista, como el *trazado de rayos (raytracing)*, se clasifican conforme la dirección en la que se calculan los rayos en una escena. Los rayos se pueden trazar desde la fuente de iluminación hasta el observador (*forward raytracing*), desde el observador hasta la fuente de iluminación (*backward raytracing*) o en ambas direcciones [97]. Seguir los rayos de luz, hacia delante o hacia detrás, implica los mismos problemas básicos: calcular la dirección del rayo, determinar qué superficie intersecta el rayo y calcular la interacción de la luz con la superficie.

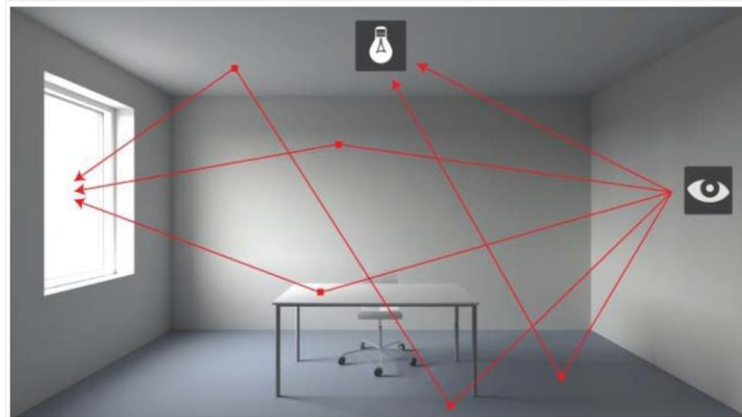


Figura 121: *Backward Raytracing* [68].

La *distribución de luminancias* de la fuente de luz determina la contribución de luminancias de la escena bajo un determinado punto de vista. Si un rayo choca con un objeto distinto de una fuente de luz, se calcula su *luminancia*, se aplica un algoritmo de reflexión y se trazan nuevos rayos. La distribución angular bajo la cual los rayos secundarios son generados depende de las propiedades ópticas del objeto [68].

El rayo, en cada interacción, pierde su intensidad por reflexiones o refracciones, y por el proceso de absorción. El proceso de trazado de rayos se repite hasta que el rayo alcanza una fuente de luz o su intensidad ha caído por debajo de un cierto nivel predefinido, que es cuando éste ha llegado a ser demasiado débil para contribuir significativamente a la iluminación de la habitación [168].

Es obvio que si los rayos tienen un ángulo sólido muy pequeño se necesita más tiempo de computación para trazar todos los posibles rayos de luz desde sus fuentes hasta la distribución final en la habitación. Por esta razón, este método a menudo se combina con el *Método estadístico de Monte Carlo* [169].

En el *Método estadístico de Monte Carlo* se utiliza un generador de números aleatorios junto con una función de distribución predefinida para determinar la dirección en la cual se trazará el rayo. Este método puede ser aplicado a toda la semiesfera (un rayo sólo), o a la subdivisión de dicha semiesfera en múltiples superficies. En este último método el número de rayos dependerá del número de subdivisiones.

Con el método del *trazado de rayos* no hay restricciones geométricas ni tampoco se imponen características de reflexión de las superficies, por lo que se pueden modelar reflexiones especulares,

semiespeculares y difusas. Proporciona un medio para calcular el fenómeno de la iluminación debido a iluminación directa, superficies especulares y reflexiones en el espacio. Sus limitaciones afectan al cálculo de modelos en los que entran en juego múltiples reflexiones difusas o efectos de iluminación indirecta [97].

El mayor inconveniente del *trazado de rayos* es que los resultados sólo son válidos para un punto de vista. Para visualizarlo desde otro punto de vista distinto, todos los cálculos tienen que volver a hacerse de nuevo. La ventaja es que el número de rayos que no son relevantes para la imagen es limitado y pueden producirse visualizaciones de una gran calidad.

### Algoritmos dependientes de la escena

Los algoritmos dependientes de la escena como la *radiosidad* (*radiosity*) son adaptaciones de las técnicas de transferencias de calor a las simulaciones de iluminación. Los algoritmos dependientes de la escena tienen la ventaja de que no dependen de la posición del observador, por lo que un solo cálculo arroja resultados de toda la escena [97].

La *radiosidad* representa la *intensidad radiante total* que sale de una superficie. Considera la suma de la radiación emitida por la superficie, y la radiación reflejada por dicha superficie. En el ámbito térmico, la combinación de estos dos componentes permite determinar el intercambio de energía neto entre múltiples superficies.

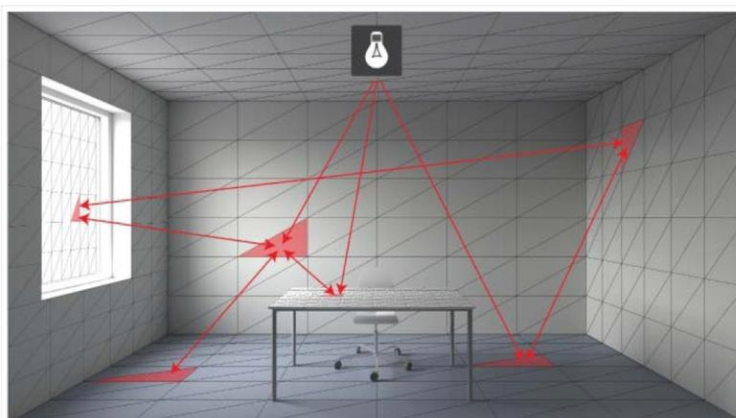


Figura 122: *Radiosidad*[68].

El cálculo de la transferencia de radiación entre diferentes cuerpos requiere la solución de un conjunto de ecuaciones simultáneas. En estos cálculos, la configuración geométrica se representa mediante un conjunto de números llamados *factores de forma*, que dan la proporción de radiación de una superficie dada y alcanza a otra superficie, o expresado de otra forma, la proporción en que una superficie «ve» a otra [68].

Los *factores de forma* pueden ser calculados utilizando fórmulas analíticas estandarizadas para diferentes situaciones geométricas. Además existen diferentes métodos de cálculo aproximativos para situaciones en las que el cálculo completo de todos los *factores de forma* consume demasiado tiempo o es imposible. El cálculo de los *factores de forma* es frecuentemente posible sólo mediante el *Método estadístico de Monte Carlo* [168] [169].

Bajo este algoritmo de cálculo la escena se divide primero en elementos de superficie y se determina el valor radiométrico de cada superficie, independientemente del punto de vista [97]. En el método de la *radiosidad* cada superficie es tratada como un reflector perfectamente difuso (*Ley de Lambert*) con una luminancia constante por lo que el intercambio radiante entre dos superficies se



puede describir mediante un único número que depende de las propiedades reflectivas de las superficies y de la geometría de la escena [168].

Para calcular la *distribución de luminancias* en el interior de una habitación debido a la iluminación natural, el flujo luminoso que entra por las zonas transparentes de la envolvente se considera igual al flujo luminoso disponible en el edificio. Este supuesto define un conjunto de ecuaciones que determinan las luminancias de todas las superficies consideradas [84]. Uno de sus puntos débiles es la imposibilidad de reproducir buenas reflexiones especulares, que se ve compensada mediante una mayor división de las superficies. Debido a que las fórmulas de cálculo son más complejas, el método se utiliza sobre todo para cálculos de iluminación más que para la generación de imágenes [97].

Otros algoritmos dependientes de la escena son conocidos como enfoques integrales, entre los que se encuentran el método del *mapeado de fotones (photon map)*. Están considerados como de los más eficientes y precisos a la hora de resolver el problema de la iluminación global ya que combinan el *trazado de rayos* y la *radiosidad* en base a diferentes métodos. Esta combinación permite aprovechar la precisión del *trazado de rayos* en cuanto a las reflexiones especulares y la precisión de la *radiosidad* para la determinación de la iluminancia en superficies perfectamente difusas [97] [168].

En el *mapeado de fotones* se envían paquetes de energía (fotones) a las superficies involucradas en el cálculo. Estos resultados se almacenan por cada escena mientras se aplican algoritmos de *trazado de rayos* y de *radiosidad* superficial. Este método es especialmente indicado para el cálculo de escenas donde existen concentraciones de luz, como la incidencia solar directa [97].

#### 2.2.4.2 Simulación energética

---

La radiación solar transmitida hacia el interior de un espacio a través de los huecos, el aspecto térmico de la iluminación natural, es uno de los elementos que forman parte de las ecuaciones que describen el flujo de calor a través de la envolvente térmica y representa una carga de calor sensible, con efectos generalmente positivos en invierno y negativos en verano, teniéndose en cuenta como uno de los factores que afectan al dimensionamiento de los sistemas activos de acondicionamiento térmico [135].

El valor de las cargas térmicas en un edificio se obtiene como resultado de resolver las *ecuaciones de transferencia de calor de conducción, convección y radiación* considerando las condiciones climáticas exteriores, las características de la envolvente, las cargas internas del espacio, así como las infiltraciones de aire. Los términos físicos involucrados en la transferencia de calor entre los edificios, ocupantes y el entorno son bastante complejos y la resolución de dichas ecuaciones requiere del cálculo computacional si se quieren obtener valores de cierta precisión [136].

Estos factores hacen que la simulación energética de un edificio requiera unas de las más complejas herramientas de cálculo, capaz de calcular el consumo energético de un edificio hora a hora para un año completo [109] [136]. Para la resolución de las *ecuaciones de transferencia de calor*, las herramientas de simulación energética requieren, además, de un método de cálculo que describa el protocolo u orden a seguir, y que establezca las hipótesis de partida y simplificaciones aplicadas.

En la práctica, la precisión de los resultados obtenidos depende de la precisión de los datos de entrada y de las simplificaciones que se asuman durante el proceso de cálculo. En este sentido, el mayor avance de los nuevos métodos de cálculo es la restricción de simplificaciones subjetivas en

los datos de entrada que suele darse con los antiguos métodos, reduciendo, por tanto, la incertidumbre de los datos de entrada [135], además de los avances en las interfaces gráficas y la mayor experiencia de los usuarios en el manejo de estas herramientas [140].

Los métodos de cálculo que actualmente tiene normalizados la *Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (American Society of Heating, Cooling and Air-Conditioning Engineers -ASHRAE)* para la resolución de las ecuaciones de transferencia de calor son el *Método del Balance Térmico (Heat Balance Method -HBM)* y el *Método de las Series Temporales Radiantes (Radiant Time Series Method -RTSM)* [135] [136]. Aunque la evolución computacional está dejando paso a estos dos métodos, los anteriores, aunque sean simplificaciones, se siguen siendo válidos.

### **Métodos de cálculo anteriores**

Previo al pleno desarrollo de programas que permitieran emplear dichos métodos, diversas instituciones desarrollaron varios procedimientos, que eran simplificaciones de los principios del *Método del Balance Térmico (HBM)*. La principal diferencia entre los métodos *HBM* y *RTSM* y los otros métodos anteriores reside en la resolución directa de los nuevos métodos, comparada con las simplificaciones que debían realizarse con los métodos antiguos debidas a las limitaciones de las capacidades de computación disponibles anteriormente.

De entre estos métodos previos cabe destacar el Método de la Ecuación de Transferencia (Transfer Function Method -TFM), desarrollado en 1967, donde se recurre a la resolución repetitiva de ecuaciones, identificada por *ASHRAE* como la metodología fundamental del cálculo de la carga máxima de refrigeración. Este procedimiento se basa en los factores de respuesta y en la interacción del intercambio de calor entre varias superficies y fuentes de calor.

Las ecuaciones de transferencia se basan en dos conceptos: los factores de transferencia por conducción (conduction transfer factors -CTF) y los factores de ponderación (weighting factors -WF). Los CTF se utilizan para describir el flujo de calor en el interior de la envolvente térmica como una función de los valores previos de flujo de calor y los valores previos de temperatura interior y exterior. Los WF se utilizan para traducir las ganancias de calor zonales a cargas de refrigeración [136].

El Método del Factor de Ponderación para el cálculo de la carga sensible instantánea de un espacio se encuentra en un paso intermedio entre los métodos más simples, que ignoran la habilidad de la masa del edificio para almacenar energía, y los métodos más complejos. En este método las cargas térmicas son utilizadas para calcular la temperatura del aire y la proporción de calor que debe ser extraído, que se diferencia de las pérdidas y ganancias de calor fundamentalmente en la dirección del flujo de calor [135] [139].

Los materiales y la construcción de las paredes se utilizan para determinar los factores que describen la transferencia de calor entre los espacios. Los factores de ponderación representan las ecuaciones de transferencias estableciendo un método de resolución de ecuaciones diferenciales con datos discretos. Estos factores determinan el balance estático de calor entre los espacios debido al efecto de la masa térmica de los materiales, realizado en dos fases. Una de las grandes asunciones de este método es que no se basa en las ecuaciones termodinámicas. El motor de cálculo *DOE-2*, desarrollado por el *Departamento de Energía de Estados Unidos (United States Department of Energy -USDOE)*, así como todas las herramientas de simulación energética que se basan en *DOE-2*, utilizan este método de cálculo.

Como resultado de la complejidad del método *TFM*, *ASHRAE* desarrolló en 1975 el *Método de Temperatura de Carga de Refrigeración Diferencial con factores de carga de refrigeración solar (Cooling load temperature differential method with solar cooling load factors-CLTD/CLF)*, como una simplificación del mismo. Este método depende de datos tabulados para simplificar su operatividad en el cálculo manual, que estaban sujetas a continuas revisiones para obtener datos tabulados más precisos.

Debido a esto, *ASHRAE* publicó en 1993 el *Método de la Diferencia de Temperatura de la Carga de Refrigeración con carga de refrigeración solar y factores de cargas de refrigeración (Cooling load temperature difference/solar cooling load/cooling load factor -CLTD/SCL/CLF)* que es una revisión del método *CLTD/CLF*.

### **Método del Balance Térmico**

El desarrollo del *Método del Balance Térmico (Heat Balance Method -HBM)* para calcular las cargas sensibles de un espacio se basa en la *primera ley de la termodinámica (conservación de la energía)* y los principios del álgebra matricial, permitiendo obtener la carga neta instantánea sensible de calefacción y/o refrigeración en la masa de aire del espacio de estudio.

La estimación de la carga de refrigeración implica el cálculo de la *transferencia de calor* a través de cada elemento de la envolvente térmica y *el balance térmico convectivo* de la masa de aire de la habitación. Para el cálculo de la transferencia de calor a través de la envolvente se utilizan los *factores de transferencias de calor (conduction transfer factors -CTF)* que incluyen un *método de series temporales*. El cálculo de la transferencia de calor implica la multiplicación de los valores de temperatura superficial interior y exterior en un momento determinado, con los valores de temperatura superficial y el flujo de calor del momento anterior.

El *método del Balance Térmico* resuelve este conjunto de ecuaciones directamente en vez de introducir procedimientos de transformación/simplificación [55] [135] [136]. Para ello considera una serie de hipótesis que simplifican los cálculos. La principal es que el aire de la zona térmica se modela como perfectamente mezclada, es decir, que la temperatura en toda la masa de aire es constante y uniforme. También se establece la hipótesis de que las superficies de la habitación tienen una temperatura superficial uniforme, una radiación en onda corta y onda larga uniforme, de forma que son superficies perfectamente difusas y la transferencia de calor por conducción es unidimensional. La aplicación de estas hipótesis sobre el modelo de cálculo forma el modelo de balance térmico.

Bajo estas hipótesis, el *Método del Balance Térmico* se descompone en cuatro procesos distintos: el balance térmico en la cara exterior de las superficies, el proceso de conducción térmica a través de las mismas (mediante la resolución de las ecuaciones de transferencia de calor), el balance térmico en la cara interior de las superficies y el balance térmico del aire [135].

Para calcular la ganancia solar a través de las ventanas, el *Método del Balance Térmico* establece un procedimiento de cálculo mediante el uso del *Coefficiente de Ganancias Solares (Solar Heat Gain Coefficient -SHGC)* que considera tanto la radiación solar transmitida como la fracción de la energía solar absorbida que se re-irradia hacia el interior, tanto de forma directa como difusa [135].

La radiación solar transmitida va directamente hacia las superficies de la zona y se contabiliza en el balance térmico de la cara interior de las superficies siendo asumido sin dificultad por el modelo de balance térmico. La radiación directa se podría determinar mediante la posición relativa

del Sol, pero esto implica una radiación parcial de las superficies, la cual es inconsistente con el resto del modelo de la zona, que asume unas condiciones uniformes en toda la superficie.

La energía solar absorbida que se re-irradia hacia el interior interactúa con las otras superficies de la envolvente mediante un intercambio energético en onda larga y con el aire de la zona mediante una transferencia de calor convectiva. Esta energía depende de las propiedades geométricas y radiantes de las superficies de la envolvente y de las características convectivas dentro y fuera de la zona.

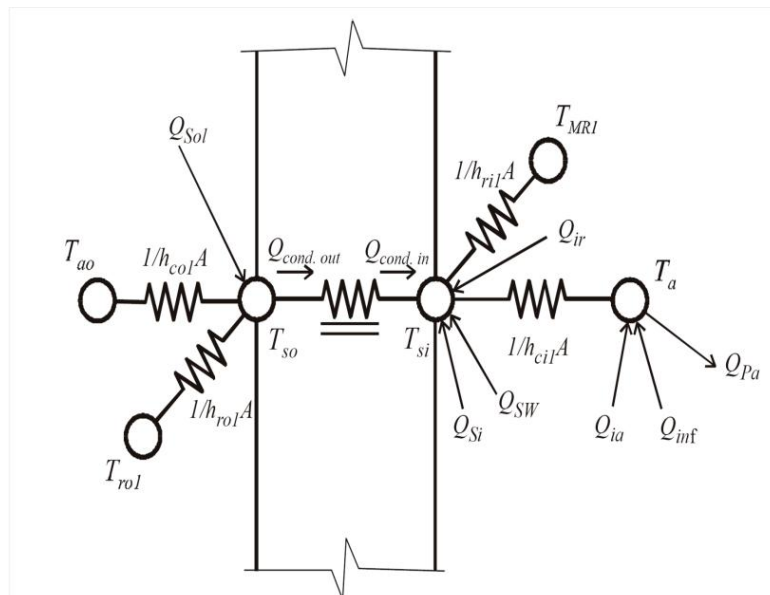


Figura 123: Los procesos del Método del Balance Térmico representado como una red nodal [55].

La única forma de modelar estas interacciones correctamente es combinar el modelo de la ventana con el modelo del balance térmico de la zona y resolver ambos modelos simultáneamente. Este procedimiento se ha implementado recientemente en algunos programas de análisis energéticos, pero no están disponibles en los procedimientos generales de cálculo de cargas.

Normalmente el valor de *SHGC* que se utiliza se refiere a condiciones de incidencia normal de la radiación solar, pero la incidencia solar depende de la posición relativa del Sol, por lo que es necesario conocer los valores de *SHGC* según los ángulos de incidencia, que pueden ser calculados con el programa *WINDOW*, desarrollado por el *Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley* (*Lawrence Berkeley National Laboratory -LBNL*).

Utilizando la definición de *SHGC* y conociendo la intensidad de la radiación solar apropiada, se puede obtener la fracción de energía absorbida que fluye hacia el interior de la zona. En la formulación del balance térmico de las cargas de una zona, este flujo de calor se combina con los provocados por la conducción de calor a través del acristalamiento y se incluye en el balance térmico de la superficie.

El único programa que actualmente utiliza el *Método del Balance Térmico* en toda su complejidad es el motor de cálculo *EnergyPlus*, y por tanto, todos los programas de análisis energéticos creados alrededor del mismo. Este método se utiliza principalmente para el análisis energético de los edificios, no para el análisis de la carga punta, que es la que sirve de base para el cálculo de los sistemas de climatización.

## Método de las Series Temporales Radiantes

El *Método de las Series Radiantes Temporales (Radiant Time Series Method -RTSM)* es un método simplificado para llevar a cabo el cálculo de las cargas de refrigeración de diseño que deriva del *Método del Balance Térmico*. Este método reemplaza todos los demás métodos simplificados desarrollados anteriormente (*TFM, CLTD/CLF, TEDT/TA*).

Este método se desarrolló para ofrecer un procedimiento de cálculo riguroso, que no requiera la complejidad del *Método del Balance Térmico*, y que permita obtener la contribución de cada componente involucrado en el flujo de calor de un edificio, obteniendo finalmente las cargas de refrigeración de diseño para poder diseñar los sistemas de climatización necesarios. Al obtener la contribución de cada elemento constructivo y de cada tipo de zona, es posible inspeccionar y evaluar su efecto relativo en el resultado global.

Este método también asume unas ciertas hipótesis de partida que simplifican las condiciones de contorno a tener en cuenta en la resolución de las ecuaciones. En primer lugar, asume que las cargas de refrigeración de diseño se basan en la hipótesis de que las condiciones de cálculo siguen una periodicidad de 24h. Es decir, que las condiciones climáticas del día de diseño, la ocupación y las condiciones de ganancias térmicas se repiten cada 24 horas por lo que para un componente en particular, a una hora en concreto, la ganancia térmica es similar a la misma hora del día anterior. Esta hipótesis es la diferencia fundamental entre el *Método de las Series Radiantes Temporales* y el *Método del Balance Térmico* [135] [136].

Bajo esta hipótesis de partida, el desfase temporal de la transferencia de calor debido a la masa térmica de los elementos opacos y la variabilidad temporal de las ganancias solares no tienen cabida. Para incluir ambos factores en el proceso de cálculo, el *método RTS* aplica unos coeficientes a las series temporales de 24 horas. Dichos coeficientes, que se llaman *factores temporales radiantes* y *factores temporales conductivos*, se obtienen utilizando el *Método del Balance Térmico* y reflejan la variabilidad temporal horaria anual de la inercia térmica y la conversión de la ganancia solar a través de los huecos en cargas de refrigeración.

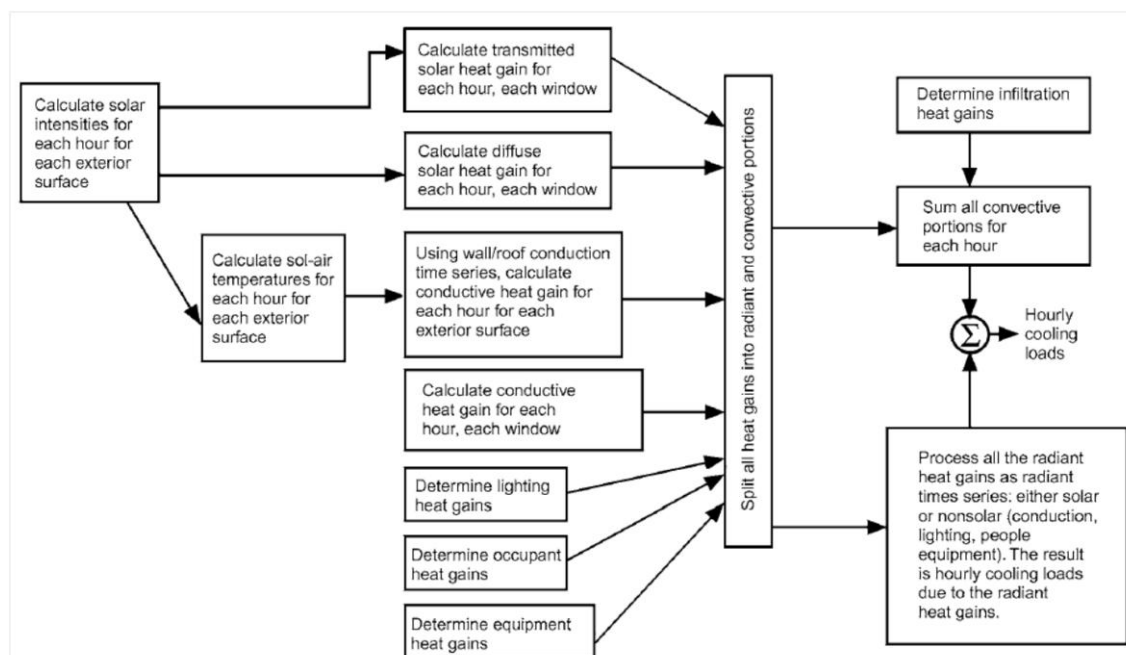


Figura 124: Visión general del *Método de las Series Temporales Radiantes* [135].

Los *factores temporales radiantes* reflejan el porcentaje de ganancia solar radiante introducida anteriormente en el espacio que se convierte en carga de refrigeración durante la hora que se está calculando. Del mismo modo, los *factores temporales conductivos* reflejan el porcentaje de ganancia térmica absorbida en el exterior de las superficies en momentos anteriores que se convierte en una ganancia térmica en el interior de la zona en la hora que se está calculando. Por definición, cada serie temporal radiante o conductiva debe sumar un total de 100%.

En el *Método de las Series Temporales Radiantes*, el cálculo de la radiación solar, las ganancias solares a través de las ventanas, las temperaturas Sol-aire y de las infiltraciones se realiza exactamente igual que en los métodos simplificados (*TFM* y *TEDT/TA*) pero con algunas diferencias: se calculan las ganancias térmicas por conducción, se dividen todas las ganancias térmicas en sus fracciones convectiva y radiante, y se convierten las ganancias radiantes en cargas de refrigeración.

Después de calcular las cargas para cada componente para cada hora, la suma de éstos dará como resultado la carga total en cada hora [135]. Si se repite este proceso para diferentes periodos representativos se puede obtener la carga total y desglosada en cada hora de ese periodo. Si se consideran 365 periodos de cálculo a lo largo del año se obtiene la carga térmica desglosada en cada hora que proporciona cada uno de los elementos que componen el modelo de cálculo.

### 2.2.4.3 Comparación y validación

---

Ante la diversidad de programas con los que se pueden obtener el comportamiento de un edificio, siempre queda la duda de cuál es el nivel de precisión de los resultados que proporcionan, qué experiencia en el manejo del programa es necesaria para obtenerlos, aparte de cuestiones más subjetivas como la intuitividad y facilidad en su manejo o el tipo de resultados que arroja [68] [170] [171], por lo que es inevitable la comparación y comprobación entre los diferentes entornos de cálculo [172]. Es más, el uso de los actuales y futuros programas de simulación depende en gran medida de su precisión, demostrada a través de la publicación de su validación [173] [174].

Desde la comunidad científica se han realizado multitud de estudios comparativos de programas de simulación. Estos estudios generalmente pueden dividirse en dos grupos: las comparaciones con mediciones de la realidad construida y las comparaciones bajo condiciones controladas de laboratorio. Las primeras están destinadas a examinar los programas de simulación para su uso por otros usuarios durante las fases de diseño de los edificios. Las segundas principalmente se realizan para demostrar la precisión en los cálculos [97] [159].

En general, se ha demostrado que cuando se comparan los parámetros simulados con los valores medidos, ya sea en modelos a escala o en casos reales, los principales problemas de imprecisión son debidos al gran número de errores cometidos en la introducción de datos, así como en las variaciones en las mediciones [143] [165] [175] [176].

Un programa de simulación contiene cientos de variables y parámetros. El número de posibles casos que pueden ser simulados mediante la variación dichos parámetros combinados es astronómico, por lo que es imposible probar todos los casos y con ello la totalidad de la precisión de los resultados de cálculo. Por eso el *Laboratorio Nacional de Energía Renovable (National Renewable Energy Laboratory -NREL)* propuso una metodología de validación basada en tres tipos de pruebas [98]:

- *Verificación analítica*: en la que se comparan los datos de salida de un programa, subrutina o algoritmo con el resultado conocido de una expresión analítica para mecanismos aislados de transferencia de energía, bajo condiciones de contorno muy simples.

- *Validación empírica*: en la que los resultados calculados por un programa, subrutina o algoritmo se comparan con los datos monitorizados de un espacio real, de una habitación de pruebas o de un experimento de laboratorio.
- *Prueba de comparación*: en la que el programa es comparado consigo mismo o con otros programas de simulación. También incluye lo que se conoce como prueba de sensibilidad y comparaciones intermodales.

La *verificación analítica* permite identificar las capacidades y limitaciones de un programa, y, por lo tanto, los errores cuando se utiliza fuera de su ámbito de aplicación [97]. Éste es el caso de *Khodulev* y *Kopylov* [177] que compararon los programas *Lightscape*, *Radiance* y *Specter* con resultados teóricos. Sin embargo, el enfoque analítico requiere de la asunción de hipótesis y condiciones de partida que con frecuencia no reflejan la complejidad del mundo real.

La *validación empírica o calibración* ha sido una de las líneas de actuación base de programas de investigación, impulsados por instituciones como la *IEA* y la *Comisión Europea*, cuyo origen se remonta a finales de los años 70, siendo el objetivo fundamental de la *validación empírica* el de probar la precisión de los resultados de simulación y, de esta forma, aumentar la confianza en los modelos y herramientas [138] [178] [179].

La comparación de los resultados de cálculo que arrojan diferentes programas no garantiza que ninguno de los programas refleje la realidad, por lo que siempre es necesario tener algún parámetro de referencia [159], debidamente calibrado con modelos reales. Para obtener estos valores de referencia del comportamiento real se han realizado numerosas campañas de medición y monitorización de diferentes elementos en modelos a escala real [180] [181] [182], a través de la construcción de las conocidas como células de ensayo o test cells.

Desde los aspectos térmicos, bajo la acción de la *tarea 12* sobre ventanas y huecos del Programa Conservación de Energía en Edificios y Sistemas Comunitarios (*Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme -IEA-ECBCS*, 1982-1986), se caracterizó la transmisión de energía solar a través de las ventanas en habitaciones de ensayo, exentas o incorporadas a edificios, tanto en Estados Unidos, como la instalación de ensayo solar pasiva en la *Oficina Nacional de Normalización (National Bureau of Standards Passive Solar Test Facility)*, como en Europa, como el edificio experimental del *Laboratorio de Energía Solar y Física de la Edificación de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (Solar Energy and Building Physics Laboratory -LESO-PB)* [69] [173].

Los primeros proyectos de la *IEA* mostraron grandes diferencias en las cargas térmicas de calefacción y refrigeración calculadas con los programas de simulación energética dinámica en base horaria, por lo que se planteó dentro de la *tarea 12* la comparación de los resultados de cálculo de seis programas (*DEROB*, *DYWON*, *PASSIM*, *DOE-2*, *SERI-RES* y *HELIOSI*) para comparar en más detalle los procedimientos de cálculo relacionados con las ventanas [183]. Para ello se utilizó una de las habitaciones de ensayo de *LESO-PB* y las condiciones climáticas estandarizadas de Ginebra.

Tanto en este trabajo, como en el realizado por *Bloomfield et al.* [184], se concluye que la predicción de la radiación solar que entra en las diferentes células de prueba y su distribución en las superficies interiores, así como la división entre la radiación directa y difusa, son unas de las causas de las divergencias entre la realidad y la simulación, y entre los diferentes programas utilizados [183]. Este hecho ha llevado a la continua revisión y actualización de los modelos energéticos implementados en los programas de simulación, como el caso de *EnergyPlus* [185] [186].

También bajo la *tarea 8* sobre edificios pasivos o híbridos solares de bajo consumo energético del Programa Calefacción y Refrigeración Solar de la IEA (*Solar Heating and Cooling Programme - IEA SHC*, 1982-1988) se procedió a la validación de modelos de simulación en base a datos adquiridos en salas de ensayo [70], realizando la comparación también entre los diversos modelos. En esta tarea se utilizaron doce programas de cálculo para obtener las ganancias solares directas que se midieron en la sala de pruebas ubicada en Ottawa (Canadá) [187].

Frente a la diversidad de los primeros experimentos, haciendo muy difícil la comparación entre sus resultados, se promovió la estandarización de las condiciones de medida y comparación, así como el desarrollo de metodologías de toma de datos y de validación de los programas de simulación energética [188], siendo de especial relevancia el *Proyecto PASSYS (Passive Solar Components and Systems Testing*, 1986-1989) [189] [190] con la normalización de las células de ensayo, implementadas en diversas localizaciones europeas a mediados de los años 80 [191] [192]. La actualización tecnológica de las mismas (*Proyecto PASLINK*), ha ampliado su área de actuación a otros campos no contemplados en su concepción original, como el de la iluminación natural.

La comparación de los resultados de cálculo con los valores de los parámetros medidos bajo la acción continuada de las condiciones climáticas ha permitido la validación empírica bajo condiciones «controladas» de los algoritmos de cálculo al reducirse el número de incertidumbres, así como también establecer un método de calibración de los modelos de simulación [173] [180] [193] [194]. Del mismo modo también ha permitido, una vez calibrados los modelos, el análisis comparativo de las diferentes variaciones de un mismo elemento, como los sistemas de ventana [195], comparados por *Lollini et al.*, en células de prueba y simulados con *DesignBuilder* como interfaz de *EnergyPlus*.

En esta línea, *Mardaljevic* validó con éxito el programa *Radiance* para un conjunto de mediciones de cielo despejado y nublado en una habitación con tres sistemas de acristalamiento [196]. Este trabajo fue el germen para la validación de *Radiance* mediante el conjunto de datos de las condiciones de prueba aprobada por el *BRE*.

Las discrepancias de los resultados llevados a cabo en los primeros estudios de validación demostraron la importancia de la planificación de las pruebas de validación, haciendo énfasis en controlar exhaustivamente las fuentes de errores externas [98]. Los estudios mostraron también el potencial de diagnóstico de los programas de simulación que residía en la combinación de las técnicas de comparación junto con los métodos de validación empírica.

Con el objetivo de proporcionar una implementación práctica de los procedimientos y los datos para toda la metodología de validación, se unieron los grupos de trabajo de las tareas *SHC 12* y *ECBSC 21*, dando como resultado el *Método BESTEST (Building Energy Simulation Test)* [98] [192].

El *Método BESTEST* se basa en la proposición de un conjunto de casos de prueba muy bien definidos que permiten la comparación entre programas, así como el diagnóstico de los mismos. Estos casos de prueba son representativos de lo que se considera el estado del arte actual de la simulación energética. De geometría sencilla para su mejor modelizado, se aportan los resultados de los modelos analíticos, por lo que este método no sólo permite la comparación entre los programas, sino también conocer la precisión de los mismos para los diferentes casos [98]. La demostración de la validez de este método ha hecho que se le recoja por la *ASHRAE* mediante el '*ASHRAE Standard 140*' [162] [197]. Su expansión y normalización hace de este método un sello de calidad, vigente a día de hoy [192] [198] [199].

Como consecuencia de ello, actualmente existen múltiples estudios de validación de programas de simulación energética, de modelos energéticos o bien de algoritmos de cálculo, así como



estudios comparativos entre diferentes programas, ya sea para conocer la divergencia entre ellos, o centrados en el punto de vista del usuario final [198]. De especial relevancia para el desarrollo de esta tesis, son aquellas validaciones sobre la simulación de las ganancias solares térmicas a través de los huecos como la publicación de *Loutzenhiser et al.* [200] [201] [202], en la que se validan empíricamente los algoritmos de cálculo de los cuatro principales programas de simulación energética, *EnergyPlus*, *DOE-2*, *TRNSYS* y *ESP-r*, o la publicación de *Yao et al.* [203], en la que se valida un nuevo programa de cálculo térmico de ventanas mediante la comparación con los resultados que ofrece *ESP-r* [173].

En el campo lumínico, la *tarea 21* sobre iluminación natural en los edificios del *Programa SHC* de la *IEA* (1995-1999) fue el marco en el que se desarrolló un primer trabajo en el campo de la validación de los programas de iluminación. En dicho trabajo se creó un conjunto de validaciones experimentales y se comparó frente a los resultados arrojados por las herramientas existentes [204].

Sin embargo, los estudios comparativos fuera del ámbito de la *IEA* de programas de iluminación con mediciones en modelos a escala o en casos reales han sido muy numerosos [97] [145] [180] [205]: *Ubbelohde y Humman* [206] compararon los resultados de cuatro programas, incluido *Radiance*, con mediciones llevadas a cabo en un edificio en San Francisco; *Ashmore y Richens* [207] también estudiaron cuatro programas y compararon los resultados con un modelo a escala bajo dos cielos nublados artificiales diferentes. Estudios similares fueron realizados por *Acosta et al.* [208] [209], *Galasiu y Atif* [210] y *Ng* [211], entre muchos otros.

Mientras estos estudios comparan la precisión de diversos programas, también se realizaron estudios comparativos donde se analizan los resultados de un único programa con un único modelo a escala y, fundamentalmente, con mediciones de casos reales [1] [212] [213] [214]. Otros estudios, sin embargo, se centran en el punto de vista del usuario (p.ej. los arquitectos) para realizar dicha comparación en base a la interfaz, la facilidad de creación de los modelos, de introducir los datos que se requieren y por las características de los datos de salida, entre otros aspectos [215].

Como continuación del trabajo de validación de programas de simulación de iluminación natural de la *tarea 21*, y para ampliar los diferentes aspectos de la propagación de la luz cubiertos con este tipo de conjunto de datos fiables, *Maamari y Fontoynt* [159] desarrollaron un conjunto de escenarios de prueba. Más tarde, las actividades del *Comité Técnico 3.33* de la *CIE* y de la *subtarea C* de la *tarea 31* del *Programa SHC* de la *IEA*, incluyeron la recopilación y definición de un conjunto de casos de prueba sencillos [216] [217], dando lugar al informe '*CIE 171:2006 sobre Casos de Prueba para la Evaluación de la Precisión de Programas de Iluminación*' [99].

El objetivo del informe '*CIE 171:2006*' es ayudar a los usuarios y desarrolladores de programas de iluminación determinar la precisión de los programas informáticos de iluminación e identificar sus debilidades. Esta validación se basa en el estudio por separado de diferentes aspectos de la propagación de la luz. Cada uno de los casos de prueba diseñados evalúa un aspecto del dominio de la simulación de iluminación y se asocia con unos resultados de referencia.

Los resultados de referencia se clasifican en dos tipos: los datos basados en cálculos analíticos y los basados en mediciones experimentales. Los primeros están asociados con escenarios teóricos, lo que elimina incertidumbres en los valores de referencia. Los segundos se obtienen a través de mediciones experimentales, donde se definen el escenario y el protocolo para minimizar las incertidumbres asociadas con las mediciones. Los casos de prueba de los aspectos del cálculo de la iluminación natural utilizan resultados analíticos de referencia para su validación.

Actualmente, ya existen varios programas de simulación de iluminación que han sido validados para todos o sólo algunos determinados aspectos de la propagación de la luz, como *Lightscape*,

*3Ds Max Design, Radiance, Velux Daylight Visualizer y AGi32* [161] [216] [218]. Sin embargo, la simplicidad de los casos *CIE* ha llevado al desarrollo de conjuntos de prueba más complejos, como los desarrollados por la *IRC-NRC*, con los que se han validado programas como *3Ds Max Design* y *DAYSIM*[160].

## 2.3 Criterios y Recomendaciones

Hemos visto cómo se calcula la cantidad de *radiación solar*, en su vertiente lumínica y térmica, que entra en los edificios a través de sus huecos. Para facilitar la comprensión de los resultados de cálculo, éstos suelen venir expresados a través de diferentes indicadores, que se pueden definir como “*una combinación matemática de mediciones y características que se expresan en una escala continua*”. El término «indicador» implica un ensamblaje más complejo de información que una simple medición directa, por lo que no puede ser determinado de forma inmediata en una campaña de medición [1] [125].

El objetivo de un indicador es combinar varios factores que darán una predicción de comportamiento, sobre la que se pueden tomar decisiones. El comportamiento de cierto aspecto puede ser descrito por varios indicadores, de hecho los más útiles suelen tener un significado intuitivo para los usuarios por lo que pueden ser entendidas con facilidad. Una vez que éstos se depuran para ser fácilmente interpretables y se validan sus capacidades para predecir un comportamiento, se pueden establecer criterios para aportar directrices y recomendaciones [115].

Si bien existe una cierta diferencia entre unidad de medida e indicador, también existe cierta diferencia entre un indicador y un criterio. Un criterio es la demarcación en una escala que determina si se cumple con unos mínimos o excede de unos máximos. Los criterios de interpretación de los indicadores y las unidades de medida son los elementos que vienen recogidos en los diferentes documentos legislativos, guías y recomendaciones de las diferentes instituciones. En el ámbito de la iluminación natural los primeros criterios se remontan a principios del siglo XIX.

Con la Revolución Industrial y la gran emigración de población rural a las ciudades se produjo un crecimiento exacerbado de las mismas provocando la densificación y masificación de las zonas residenciales alrededor de las industrias. El deterioro de las condiciones habitacionales de estas zonas llevó a establecer una de las primeras Normas de Salubridad y Seguridad en la construcción de viviendas en Londres, junto con el establecimiento de la *Servidumbre de Luz Natural (Rights of Light-1832)* [48].



Figura 125: Carteles acreditando su derecho a la luz en Londres.

La necesidad de medir la luz natural en los espacios para justificar dicha servidumbre fue el motor para el desarrollo y expansión de las unidades de medida de iluminación, de los primeros luxómetros así como para el desarrollo del concepto de *Factor de Cielo (SF)* y posteriormente el

*Factor de Iluminación Natural (DF)* [1] [50], pretendiendo ser éste una medida del potencial de iluminación natural de un espacio.

También fue la aplicación de esta servidumbre la promotora de los diferentes *métodos gráficos* de iluminación natural, como el desarrollado por *P. Waldram* en 1923, así como del desarrollo de diferentes reglas de oro de iluminación natural, que, basadas en la experiencia, permiten considerar las condiciones de iluminación natural en las primeras fases del proyecto arquitectónico, aunque actualmente hayan caído en desuso, al menos en España.

Esta servidumbre de iluminación natural ha resultado ser de gran relevancia en cuanto que es uno de los primeros textos que forman parte de la legislación sobre iluminación natural, siendo germen de la legislación posterior. En realidad, gran parte de las recomendaciones y normativas actuales sobre iluminación natural se basan en las prescripciones y requisitos que se establecieron con dicha servidumbre, convirtiéndose en referentes a nivel mundial.

Actualmente el panorama internacional cuenta con recomendaciones sobre iluminación natural, de no obligado cumplimiento elaboradas por organismos como la *CIE* o por la *Organización Internacional de Normalización (International Standard Organization -ISO)*, que trabaja con su análogo europeo, el *Comité Europeo de Normalización (Comité Européen de Normalisation -CEN)*. Además de los organismos internacionales, los estándares publicados por la *IESNA*, pese a ser recomendaciones a nivel nacional, son actualmente un referente a nivel internacional, por lo que también es necesario tenerlos en cuenta. Sin embargo, la aplicación en el ámbito arquitectónico de estos criterios y recomendaciones depende exclusivamente de la voluntad y el conocimiento que tenga el arquitecto de su existencia.

A nivel nacional, algunos de estos criterios internacionales han sido traspuestos, pero no en todos los países. En el ámbito europeo, la trasposición a normativa nacional de obligado cumplimiento se realiza en base a las Directivas emitidas por el *Consejo Europeo*. Fundamentalmente, la consideración de la iluminación natural como requisito normativo se contempla desde el ámbito de la habitabilidad de los espacios, y tampoco es un requerimiento que se exija en todos los países. En ocasiones, estos requisitos ni siquiera se establecen a nivel nacional, regional o comunitario, sino que se exponen en las normas de ámbito local.

Los requisitos normativos relativos a la iluminación natural suelen dividirse en dos partes. Por un lado aquellos requisitos referentes a las condiciones de iluminación que proporcionen habitabilidad, expresados mediante determinados *valores máximos y mínimos de superficie de ventana o valores mínimos de Factor de Iluminación Natural* [1]; y por otro, los requisitos sobre el *soleamiento* o la entrada solar directa en los espacios.

Las Normas de Salubridad y Seguridad nacidas a raíz de las condiciones higiénicas de la densificada área residencial londinense ya especificaban la *proporción mínima de superficie de ventana* respecto al espacio al que sirve, como un medio para garantizar unas ciertas condiciones de iluminación natural y ventilación.

A partir de la *Crisis Energética de 1973*, la población mundial fue plenamente consciente de la necesidad de reducir las emisiones de dióxido de carbono para mitigar la aceleración del cambio climático, dando lugar al desarrollo de diferentes normativas y recomendaciones de eficiencia energética entorno a la reducción de la demanda y el consumo energético, encaminadas hacia los edificios de consumo de energía casi nulo. Algunos de estos documentos contienen recomendaciones sobre iluminación natural, basadas en el concepto del *Factor de Iluminación Natural* o en las *reglas de oro* sobre la superficie de hueco [1] [50] [219].

Hacia finales de los 90, la iluminación natural de los edificios empezó a cobrar mayor atención de la que había tenido anteriormente [1] [50] [220]. Los mayores factores fueron:

1. La extendida creencia de que el potencial de ahorro de energía a través de un uso efectivo de la iluminación natural estaba apenas explotado.
2. La aparición de datos que sugerían que la exposición a la luz natural tenía varios efectos positivos en los habitantes de un edificio: aumentaba su productividad, su salud y su bienestar.

El primer factor es herencia de la crisis energética, tal como se ha visto anteriormente. La luz natural es una fuente limpia y gratuita de iluminación que permite ahorrar energía eléctrica durante el periodo diurno [1]. Sin embargo, es necesario controlar adecuadamente la entrada de luz solar directa en los espacios para evitar situaciones de *deslumbramiento* y *sobrecalentamiento*, y no dar lugar a que se consuma más en refrigeración de lo que se ahorra en iluminación artificial [25] [221].

Sin embargo, debido al bajo coste de la iluminación artificial, y menor aún tras la aparición de la iluminación de estado sólido, como la tecnología LED, hace que el primer factor pierda fuerza en el debate sobre la consideración y la necesidad de la iluminación natural en los edificios [50], y por tanto de su inclusión en la normativa edificatoria [1].

El segundo factor se debe a los efectos no visuales de la exposición a la luz natural [50]. Se ha demostrado a través de la fotobiología que la exposición a inadecuados niveles de radiación según las diferentes bandas del *espectro electromagnético* puede producir efectos fisiológicos y psicológicos adversos [220], por lo que se han elaborado textos sobre seguridad fotobiológica frente a la radiación óptica [222]. Actualmente este campo es una línea de investigación activa encaminada a entender cuáles son los mecanismos que relacionan la iluminación natural y el bienestar humano a través de los *fotorreceptores* presentes en nuestro organismo [1].

En este sentido es muy importante el descubrimiento en 2002 de un nuevo fotorreceptor conocido como *fotorreceptor intrínsecamente fotosensible (intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells -ipRGC)* que es responsable de la producción de la *melanopsina*, un fotopigmento relacionado con la *melatonina*, hormona reguladora de los ciclos biológicos diarios del cuerpo humano, también conocidos como *ritmos circadianos*, incluyendo los ciclos de sueño-vigilia y la producción de diferentes hormonas reguladoras del cuerpo humano [223]. Se ha demostrado que la presencia de ciertos niveles de iluminación provoca la supresión de la *melatonina* alterando el funcionamiento normal de dichos ciclos, provocando un empeoramiento de la salud.

En el ámbito normativo, el mismo fenómeno físico, la *radiación solar directa* que entra en los espacios, se legisla separadamente. La radiación solar directa en el rango visible se aborda en forma de *horas de soleamiento* en la normativa de iluminación natural, mientras que la radiación solar directa térmica viene regulada indirectamente en el marco de las directivas y normativas energéticas.

Es cierto que la extensión de los certificados medioambientales como *LEED (Leadership in Energy & Environmental Design)* [18] o *BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)* [19] ha supuesto un empuje a la consideración cuantitativa de la luz natural en los espacios, ya que, dentro de sus sistemas de créditos, el cumplimiento con las exigencias mínimas, basadas en el concepto del *Factor de Iluminación Natural*, se ve valorado con un cierto número de puntos. También es cierto que estos certificados son de aplicación voluntaria y actualmente sólo los edificios de cierta singularidad son los que suelen optar por obtener este tipo de certificados.

Desde finales de los años 90, los mayores avances en el análisis de la iluminación natural se han realizado en el campo de la modelación y en el desarrollo de nuevos sistemas y materiales de acristalamiento para un mejor *aprovechamiento de la luz natural* en los edificios [1] [220]. Así también, la aparición de los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)* está provocando la redefinición de los criterios bajo los cuales se obtienen unas condiciones adecuadas de iluminación natural.

Esto está llevando a la comunidad internacional a la revisión de los estándares, creando comisiones específicas sobre *indicadores de iluminación natural* cuyos resultados marcarán los futuros desarrollos de textos normativos sobre iluminación natural, para la adopción e inclusión de dichos indicadores, así como para establecer el proceso de transición entre el *Factor de Iluminación Natural* y los nuevos indicadores. Sin embargo, pese que se ha demostrado la efectividad de los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural*, el criterio sobre iluminación natural que permanece en la mayoría de las guías y recomendaciones todavía se basan en el *Factor de Iluminación Natural* [50] [220].

La *IESNA* ha publicado ya en Enero de 2013 [126] la primera normativa sobre los nuevos indicadores, siendo la pionera en este sentido. El *comité técnico de la CIE sobre la Modelación climática de la Luz Natural (CIE Technical Committee 3-47: Climate-Based Daylight Modelling)* también se encuentra actualmente discutiendo y finalizando el debate sobre los indicadores de iluminación natural a emplear a partir de ahora, los criterios de interpretación y su proceso de implantación. Así también el *grupo de trabajo 11 “Iluminación Natural” del comité técnico 169 del Comité Europeo de Normalización (CEN Technical Committee 169/WG 11 ‘Daylight’)* ha creado una propuesta normativa sobre iluminación natural, la primera a nivel europeo, en la que se establecen las recomendaciones sobre distintos indicadores de iluminación natural y soleamiento en los edificios [224].

### 2.3.1 Reglas de Oro de Iluminación Natural

Una regla de oro establece una especie de fórmula u observación generalmente aceptada como conocimiento práctico basado en la experiencia [225]. Las reglas de oro no son proposiciones científicas, sino empíricas, salvo algunas excepciones, como las propuestas por *Lynes*. Proporcionan unos valores aproximativos, siendo especialmente útiles en las primeras fases de diseño sin ralentizar el ritmo de trabajo.

Las reglas de oro en iluminación natural son expresiones numéricas sencillas que relacionan un elemento de interés (p.ej. la profundidad de penetración de la luz natural en un espacio) con uno o varios parámetros de diseño (p.ej. la altura del dintel de la ventana) [225]. Éstas se centran en aspectos como las proporciones del espacio, el tamaño de las ventanas, la orientación del edificio, etc., influyendo de esta manera en la forma y tipología de los edificios [226].

La primera regla de oro de la que se tiene conocimiento es la formulada por *Marco Lucio Vitruvio* [23] para la iluminación natural de los espacios teniendo en cuenta las obstrucciones exteriores. Actualmente la regla de oro de Vitruvio y sus variaciones y criterios se engloban dentro de los primeros análisis del entorno [226]. Del mismo modo, también se han formulado a lo largo de la historia reglas de oro que determinan las características de los espacios, aplicables en diferentes fases de la elaboración del proyecto arquitectónico.

Estas reglas de oro pueden quedarse como recomendaciones [27], de aplicación voluntaria, o bien formar parte del cuerpo legislativo nacional [119], aunque normalmente se suelen encontrar recogidas en forma de ordenanzas municipales del planeamiento de las ciudades [227] [228].

#### 2.3.1.1 El entorno

El estudio de la disponibilidad de iluminación natural de un determinado espacio se basa en la regla de oro formulada por *Vitruvio* [226], que indica cómo solventar el problema de la presencia de obstáculos que impidan la iluminación natural de las estancias:

*“procédase de la siguiente manera: desde la parte que considere más apropiada para que penetre la luz, trácese una línea desde lo alto de la pared que obstaculice el paso de la luz, hasta donde lo necesite, y si desde esta teórica línea, mirando hacia arriba puede contemplarse un amplio espacio de cielo, sin ningún problema la luz llegará a este punto.”*

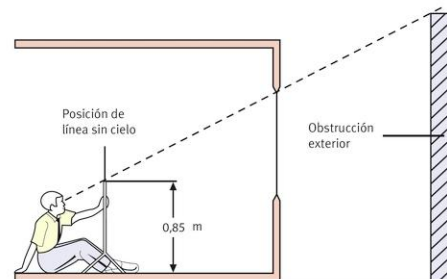


Figura 126: Regla de Oro de Vitruvio [27].

De forma simplificada se puede decir que la cantidad de luz natural que recibe un punto dentro de un edificio, conforme a la *regla de oro de Vitruvio*, es equivalente a la superficie de cielo que se ve desde dicho punto. Esta consideración ha sido la base para el desarrollo del *diagrama de Waldram* y del *diagrama Pepper Pot* de *Pilkington* [62]. Esta regla de oro también ha sido la base para la determinación de la *línea sin cielo* sobre la que se fundamenta la servidumbre de luz natural británica [48].

La guía de iluminación natural escrita por *P. Tregenza* [106] para el *Colegio de Arquitectos Británicos (Royal Institute of British Architects -RIBA)* recoge estas *reglas de oro*, así como los criterios

específicos de aplicación. En el caso del estudio de las obstrucciones exteriores, los criterios o reglas de oro son las siguientes:

- Cuando una ventana es utilizada como la fuente principal de iluminación, el ángulo de obstrucción sobre el horizonte no debe ser mayor de 25°.
- Cuando una ventana es utilizada para proporcionar soleamiento a una habitación, debe orientarse al sur y el ángulo de obstrucción sobre el horizonte no debe ser mayor de 25°.

En primera instancia, si el punto superior del nuevo edificio está por debajo de la línea de 25° dibujada a 2 metros sobre el suelo en la fachada del edificio afectado, entonces, según el *Centro de Investigación en Edificación (BRE)*, no es necesario un análisis más detallado ya que habrá una disponibilidad de cielo adecuada para la iluminación de los espacios habitables [46]. Esta misma recomendación viene recogida en las indicaciones del *Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía (IDAE)* [27] sobre *aprovechamiento de la luz natural* en relación a las condiciones del entorno y la situación del edificio en España:

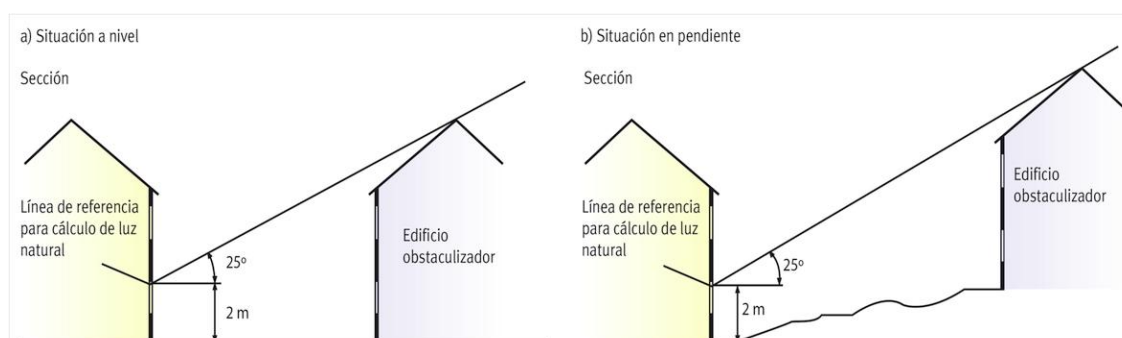


Figura 127: Explicación gráfica de la regla de la línea de 25° [27].

En el caso de los edificios existentes, esta regla se aplica en el centro de la ventana inferior del edificio afectado [106]. Esta regla, además del cálculo gráfico, ha derivado en su verificación mediante el porcentaje de *Componente Vertical de Cielo (Vertical Sky Component -VSC)*.

La *Componente Vertical de Cielo* se define como la parte de componente de cielo establecida en el *Factor de Iluminación Natural (DF)* que se recibe en un punto de un plano vertical, utilizando el *Cielo Nublado Estándar CIE*. Partiendo de la base de que si no hubiera obstrucciones se obtendría una componente de cielo del 40%, *se cumple con la regla si, pese a tener obstrucciones bajo un ángulo mayor a 25°, se obtiene una componente de cielo vertical mayor del 27%*. Este dato es especial relevante en el estudio de la viabilidad de luz natural en los centros históricos británicos, y extendido gradualmente a nivel internacional.

En base a esta regla de oro también se han propuesto diferentes *ángulos de obstrucción máximos* en función de la latitud de la localización y se han obtenido el porcentaje de componente vertical de cielo correspondiente [46].

Latitud	Ángulo de obstrucción máximo	Componente vertical de cielo
Menor de 40°	40°	18%
40°-45°	35°	21%
45°-50°	30°	24%
50°-55°	25°	27%
55°-60°	22°	29%
Mayor de 60°	20°	30%

Tabla 7: Ángulo de obstrucción máximo y *Componente Vertical de Cielo* en función de la latitud [46].



### 2.3.1.2 El edificio y sus espacios interiores

Las reglas de oro basadas en la geometría solar no sólo se aplican al estudio de las condiciones del entorno de un edificio o espacio considerado. También se aplican para limitar las sombras arrojadas por el propio edificio sobre sus espacios y para determinar la profundidad máxima de los espacios. Estas reglas geométricas han sido posteriormente traducidas a valores que pueden ser calculados mediante fórmulas sencillas, sin dejar por ello de ser proposiciones empíricas y aproximativas.

#### Sombras propias

Para evitar que la propia forma del edificio obstaculice excesivamente la penetración solar en sus espacios se aplica la regla de la línea de  $45^\circ$ . Esta regla dice que *probablemente se bloqueará una cantidad significativa de luz si el centro de la ventana se encuentra dentro del área limitada por las líneas de  $45^\circ$* , en planta y alzado, trazada a partir de los límites de la forma del edificio.



Figura 128: Limitación de las sombras propias mediante la *regla de los  $45^\circ$*  [228].

#### Profundidad del espacio

La *regla de Vitruvio* puede utilizarse para determinar la línea a partir de la cual no se ve el cielo. A partir de estas líneas sin cielo, surgen otras reglas de oro que definen la profundidad «útil» de iluminación natural expresada a partir de la altura del dintel de la ventana, determinando, en cierta forma, la apariencia exterior de los espacios.

La regla de la línea sin cielo dice que *las áreas de una habitación en las que no se tiene una visión directa del cielo tienen un bajo nivel de iluminación natural* [46]. La *línea sin cielo* se traza, a diferencia de los estudios del entorno, uniendo el punto exterior del dintel de la ventana con el punto superior de la obstrucción frontal. Sin presencia de iluminación directa del cielo, los puntos sin cielo sólo serán iluminados naturalmente mediante la componente reflejada, exterior o interior.

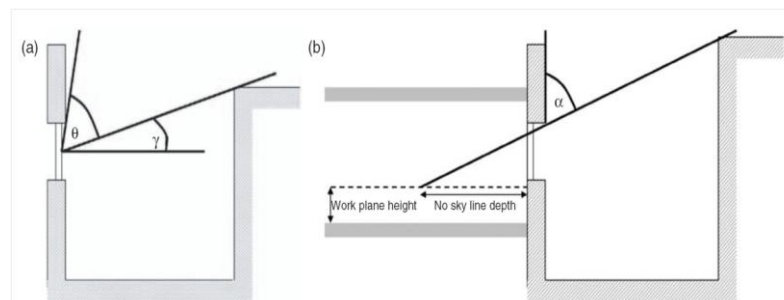


Figura 129: (a) relación geométrica entre el ángulo de cielo y el ángulo de obstrucción; (b) definición de la *línea sin cielo* [225].

Esta regla pone en relación la obstrucción exterior con la penetración de la luz directa del cielo. Pero esta penetración también depende de la posición de la ventana. De forma que se establece la relación entre la altura del dintel de la ventana y la profundidad del espacio de forma que para tener unas condiciones adecuadas de iluminación natural, con cierta uniformidad, *la profundidad del espacio debe ser de, aproximadamente, dos veces la altura del dintel de la ventana, si no existen obstrucciones exteriores* [1].

Esta regla ha sido asumida por diversas instituciones, pero con ciertas modificaciones [229]:

- *“La iluminación natural de un edificio sólo será significativa en un área de profundidad aproximadamente igual a dos veces la altura de la habitación.*
- *La máxima profundidad del área iluminada naturalmente corresponde con dos veces y media la diferencia entre la altura del dintel de la ventana y la altura del plano de trabajo.*
- *Una ventana normal puede producir una iluminación útil en una profundidad de alrededor de vez y media la altura de la ventana. Si ésta tiene estantes de luz u otros sistemas reflectores, este valor puede aumentar hasta dos veces o más la altura de la ventana.*
- *Se recomienda mantener una profundidad menor de 1’5-2 veces la altura del dintel de la ventana para tener unos niveles adecuados de iluminación natural con una distribución equilibrada.*
- *La profundidad de 1’5 veces la altura del dintel de la ventana permitirá a la luz solar proporcionar adecuados niveles de iluminación con una distribución equilibrada de luz.*
- *Existe una relación directa entre la altura del dintel de la ventana y la profundidad de penetración de la luz natural. Normalmente la luz natural adecuada penetrará hasta una profundidad de 1’5 veces la altura del dintel de la ventana, aunque puede penetrar hasta dos veces dicha altura bajo condiciones de insolación directa.*
- *Para evitar grandes rangos de iluminancias (mayores de 25:1), la distancia desde la pared de la ventana hasta la pared más interior debe estar limitada a dos veces la altura del dintel de la ventana para ventanas con acristalamiento claro.”*

El concepto de profundidad máxima para iluminación natural puede ayudar a eliminar relaciones de contraste demasiado altos. En 1979 *Lynes* propuso la siguiente ecuación relacionando la profundidad del área (D) de iluminación natural adecuada con algunas características geométricas del espacio iluminado [225]:

$$D_{Lynes} = (2 / (1 - R_{mean})) / ((1/w) + (1/h_{window-head-height}))$$

Ecuación 20: Ecuación de *Lynes* para la *profundidad máxima* [225].

Donde *w* es el ancho interior de la habitación, *h<sub>window-head-height</sub>* es la distancia entre el suelo y el dintel de la ventana. En el escrito original de *Lynes*, *R<sub>mean</sub>* era la *reflectancia* media de la mitad de la pared del fondo, repercutida sobre su área. Sin embargo, para una mayor facilidad de uso de esta regla se ha simplificado siendo la *reflectancia* media de todas las superficies interiores, acristalamientos incluidos. En caso de que hubiera obstrucciones, *Lynes* sugirió que la limitación de la profundidad debería corresponder al menor de los valores, ya sea a partir de la ecuación o de la *línea sin cielo*.

En España esta regla está recogida en la guía publicada por el *IDAE* [27] en forma de tabla, y también en el *‘Manual de Diseño ICARO’* [230], donde se indica una *profundidad máxima (D) de dos veces la altura del dintel (H) de la ventana* para satisfacer las condiciones de iluminación natural con una adecuada *uniformidad*.

En este manual se especifican varias recomendaciones, siendo *entre 1.5 y 2 veces la altura del dintel* (Fondo < 1.5 a 2 Altura de dintel), pudiendo alcanzar  $D < 2.5 H$  cuando no existan obstáculos visuales exteriores. En calles estrechas o fachadas interiores de parcela, como es el caso de patios, conviene *limitar a menos de 45° la altura angular de los obstáculos* sobre la horizontal, de manera que su altura (H) sea inferior a la separación (S) ( $H < S$ ) [230].

En 2005, C. Reinhart realizó simulaciones para comprobar la veracidad de las *reglas de oro* basadas en la altura del dintel de la ventana para determinar la profundidad del espacio iluminado [229]. Entre sus conclusiones se obtiene que *“en un espacio iluminado unilateralmente con una ventana normal con persianas venecianas, la profundidad de la zona iluminada naturalmente normalmente recae entre 1 y 2 veces la altura del dintel de la ventana. El tipo de acristalamiento y el nivel de iluminación a obtener en el espacio influyen en gran manera el número exacto. Si el espacio no requiere el uso de dispositivos de sombra, la relación entre ambas medidas puede ascender a 2’5.”*

Esta afirmación se basa en la simulación anual de la profundidad de penetración de la luz natural en espacios iluminados unilateralmente en cinco ciudades de Norteamérica. En dicho estudio, el *área iluminada naturalmente (daylit area)* se define como *“el área en la cual se obtiene un determinado nivel de iluminación mínimo con luz natural durante una proporción significativa del año cuando el espacio está ocupado”*. Esta proporción es lo que actualmente conocemos como *Autonomía de Luz Natural (DA)*. *“La profundidad máxima corresponde con aquellos puntos en los que el valor de DA desciende hasta la mitad de su máximo valor”*. Como podemos observar, las *reglas de oro* también son las bases sobre las que se fundamentan los nuevos indicadores dinámicos.

### Superficie de ventana

La ventana representa la puerta de entrada del flujo de luz hacia el interior del espacio, de forma que a mayor superficie, más cantidad de flujo luminoso se admite en el espacio y viceversa. La superficie de ventana y la cantidad de iluminación guardan una relación lineal.

La determinación de la superficie de ventana puede obtenerse mediante la regla del factor de viabilidad de luz natural, que tiene en cuenta la presencia de las obstrucciones sobre la ventana, o bien utilizando el *Factor de Iluminación Natural (DF)* como parámetro delimitante. La idea subyacente es la determinación de la superficie de ventana necesaria para obtener unos determinados niveles de iluminación en el interior del espacio con una cierta probabilidad.

El estudio de viabilidad evalúa si la cantidad de luz que entra a través de una fachada proporciona una buena iluminación natural del espacio próximo a la fachada o no. La regla principalmente constituye una condición necesaria para la iluminación natural. Cómo de satisfactoria resulta la luz natural en el espacio termina siendo dependiente de los requisitos específicos de iluminación del espacio (cuantitativo) así como de la uniformidad de la distribución de la luz natural en el espacio (cualitativo). Ambos aspectos dependen de las dimensiones del espacio y de las reflectancias de las superficies del mismo.

Este estudio sugiere que si la *superficie efectiva de apertura ajustada (adjusted effective apertura)* de una zona es mayor que un cierto límite, el *factor de viabilidad de iluminación natural (Daylight feasibility factor -DFF)*, entonces la zona tiene un alto potencial de iluminación natural, por lo que merece un análisis más exhaustivo de las condiciones de iluminación natural [225].

$$\text{Adjusted effective apertura} = \text{WWR} \times \tau_{\text{vis}} \times \text{OF} > \text{DFF}$$

Ecuación 21: *Apertura efectiva ajustada*, según el estudio de viabilidad de iluminación natural [225].

Esta *área efectiva ajustada (adjusted effective apertura)* es el producto de la apertura efectiva por su *factor de obstrucción (OF)*, siendo la apertura efectiva el producto de la *superficie relativa de la ventana respecto a la pared (Window-to-wall ratio -WWR)* por la *transmitancia visible media ( $t_{vis}$ )* de todas las ventanas de la fachada. La *superficie relativa de la ventana respecto a la pared* es la suma de todas las superficies acristaladas excluyendo parteluces y divisiones de los marcos entre la superficie de pared exterior. El *factor de obstrucción* hace una aproximación del efecto de las obstrucciones exteriores y se determina como una función del porcentaje de ventana cubierto.

El estudio de viabilidad de iluminación natural se introdujo en primer lugar en Canadá en 1989 y luego fue asumido por el *Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley*, dando valores de *DFF* de referencia de 0'22 y 0'25 respectivamente [225].

La obtención de valores altos de iluminación natural normalmente deriva en la presencia de grandes ventanales pero esta decisión resulta en excesivas pérdidas y ganancias de calor a través de los mismos. De forma inversa, las habitaciones con superficies de ventana muy pequeños apenas permiten la entrada de la luz natural como fuente de energía, por lo que el confort de los ocupantes tiende a ser menor, y el consumo de energía mayor.

### 2.3.2 Legislación sobre la radiación solar

Del mismo modo en que la *radiación solar visible* y la *radiación solar térmica* se estudian y calculan de forma separada, también se legislan de forma separada, distinguiéndose, por tanto, la normativa relacionada con la iluminación natural y la relativa a los aspectos térmicos de la iluminación natural.

Los estándares de iluminación de no obligado cumplimiento especifican valores para diferentes parámetros con la intención de definir las condiciones en las que se tiene una adecuada iluminación, natural o artificial. Generalmente estos textos son previos a la elaboración de documentos legislativos, que los toman como base para establecer valores mínimos y máximos legales.

En el ámbito europeo la legislación nacional de cada país miembro se basa, en muchos casos, en la trasposición de las directivas elaboradas por el *Consejo Europeo*. En este contexto, los requisitos relativos a la iluminación natural de los espacios entran dentro de las Condiciones mínimas de Habitabilidad de los espacios.

Estos documentos normativos tienen como base la Servidumbre de Luz Natural (Rights of Light) desarrollada en Inglaterra aunque posteriormente adaptados a las condiciones nacionales específicas. Los requisitos relativos a la *radiación solar visible* en estos textos vienen expresados generalmente mediante *valores mínimos de superficie de ventana* por cada espacio, de *Factor de Iluminación Natural (DF)* o de *horas de soleamiento*.

En España, si bien no existen requisitos mínimos establecidos a nivel nacional, son las *Ordenanzas Municipales* las que vigilan para que los edificios tengan unas Condiciones mínimas de Calidad e Higiene, aunque también pueden encontrarse determinaciones legislativas en algunas regiones, pero siempre dentro del área de calidad e higiene de la edificación.

Sin embargo la necesidad de tener unas condiciones mínimas de iluminación natural en los espacios no es un hecho que haya establecido de forma uniforme, existiendo a día de hoy muchos países donde la luz natural no forma parte de los requisitos mínimos de los edificios.

La radiación solar, además, está incluida en las normativas sobre eficiencia energética de la edificación, pero no existen valores limitadores de la cantidad de *radiación solar* que entra en un espacio, sino que interviene como un agente en el proceso de determinación de la demanda y el consumo energético de los edificios, y de la eficiencia de las instalaciones, de forma que, según el caso, se promoverá su entrada para aumentar la carga interna, generalmente en régimen de invierno, o para regular el funcionamiento de la iluminación artificial, o se bloqueará su acceso a los espacios, generalmente en régimen de verano.

También existen otros documentos que, si bien no son normas de obligado cumplimiento, su trascendencia internacional los ha convertido en referentes en cuanto a sus implicaciones medioambientales en la edificación, en los que la iluminación natural forma parte del sistema de acreditación.

#### 2.3.2.1 Estándares de aplicación voluntaria

Las directivas europeas y las normas nacionales se sirven de los estándares elaborados por los *Comités Técnicos de Normalización (CTN)* a nivel internacional (*Organización Internacional de Normalización -ISO*) o regional (p.ej., *Comité Europeo de Normalización -CEN*) traspuestas a nivel nacional (p.ej., *Normas UNE*), cuyas especificaciones no son de obligado cumplimiento sino recomendaciones, que proporcionan, entre otros, métodos de cálculo y requisitos o condiciones objetivas.

Los temas relacionados con las condiciones de iluminación, condiciones térmicas y *eficiencia energética* en la edificación se normalizan bajo la supervisión de diferentes comités técnicos. El grupo de trabajo 11 del *Comité Técnico CIE 169* sobre luz e iluminación se dedica exclusivamente a la iluminación natural, aunque todavía no ha publicado ningún estándar.

Del mismo modo en que las normativas de obligado cumplimiento se basan o hacen referencia a estos estándares de aplicación voluntaria. Para la elaboración de los mismos, los grupos de trabajo de los comités técnicos se basan en los documentos elaborados por las instituciones y organismos especializados en la materia, como el *CIE*, la *IESNA* o la *ASHRAE*, y, habitualmente, sus miembros forman parte de los grupos de trabajo de dichas organizaciones, por lo que se establece una vinculación muy estrecha entre el trabajo desarrollado en estas instituciones y el proceso de normalización.

Las condiciones de iluminación en los lugares de trabajo vienen definidas en la norma '*UNE -EN 12464*' [231] tanto para lugares de trabajo interior (*parte 1*) como exterior (*parte 2*). Esta norma establece los requisitos de iluminación para humanos en los lugares de trabajo que satisfacen las necesidades de confort y *rendimiento visual* de las personas con una capacidad oftálmica normal. Estos requisitos pueden ser proporcionados "*mediante iluminación artificial, luz natural o una combinación de ambas*". Sobre las condiciones de reflexión de las superficies, la norma recomienda los siguientes valores, si las superficies reflejan de forma difusa:

- Techo: de 0.7 a 0.9
- Paredes: de 0.5 a 0.8
- Suelo: de 0.2 a 0.4
- Mobiliario: de 0.2 a 0.7

Para cada área, tarea visual o actividad, la norma establece los requisitos de *Iluminancia media Mantenido ( $\bar{E}_m$ )* en la superficie de trabajo, el límite máximo del *Índice de Deslumbramiento Unificado (Unified Glare Rating -UGR)*, la *Uniformidad de Iluminancia mínima* y el *Índice de Reproducción Cromática (IRC)*. Además, las superficies de paredes y techo deben estar iluminadas de forma mantenida con una cierta uniformidad según los siguientes valores:

	Oficinas, áreas docentes, sanitarias y zonas comunes de los edificios		Espacios de otros usos	
	Paredes	Techo	Paredes	Techo
Iluminancia mantenida	>75 lux	>50 lux	>50 lux	>30 lux
Uniformidad	≥0.10	≥0.10	≥0.10	≥0.10

Tabla 8: Condiciones mínimas de iluminación de superficies distintas del área de trabajo [113].

En esta norma se dice que "*la luz diurna puede proporcionar la totalidad o parte de la iluminación para tareas visuales y, por tanto, ofrecer un ahorro de energía potencial. [...] Las ventanas son muy favorables en los puestos de trabajo por la luz diurna que dejan pasar, y por el contacto visual que proporcionan con el mundo exterior. Sin embargo, también hay que asegurarse de que las ventanas no causen molestias visuales o térmicas, o una pérdida de la privacidad*". Sin embargo, no se especifican métodos para cuantificarla ni se indican condiciones relativas a las ventanas.

Respecto a los requisitos de *eficiencia energética*, es la norma '*UNE -EN 15193*' [232] la que especifica la metodología de cálculo para la evaluación del consumo energético de las instalaciones de iluminación artificial, proporcionando un indicador de la eficiencia energética de la instalación.

Dentro de los métodos de cálculo, el denominado método comprensivo permite tener en consideración la iluminación natural mediante el cálculo del *Factor de Dependencia de Luz Natural (FD)*. Este factor relaciona el uso de la potencia de iluminación total instalada con la disponibilidad de luz natural en el local o zona, considerando también el sistema de regulación de la instalación de iluminación artificial, concepto muy próximo a los fundamentos de la *Autonomía de Luz Natural (DA)*.

El cálculo de este *Factor de Dependencia de Luz Natural* se basa en:

- la *regla de oro de Vitruvio* para la determinación de la máxima penetración solar,
- la relación entre las superficies acristaladas y la superficie horizontal iluminada,
- las condiciones de reducción de la luz incidente en los huecos debido a las obstrucciones, muy similar a la *regla de la línea de 25°*

El acceso del espacio a la luz natural es función de estos tres factores, más la consideración del impacto de los elementos de oscurecimiento, expresado en tanto por ciento. Este concepto de acceso a la luz natural no es más que la expresión, con otras palabras, del concepto del *Factor de Iluminación Natural (DF)*, sólo que denominado *Factor de Luz Natural o de Día (FLD)*.

La norma '*UNE -EN 12665*' define el *Factor de Luz Natural o de Día* como "*la relación entre la iluminancia, en un punto dado del plano, debida a la luz recibida directa o indirectamente desde un cielo cuya distribución de luminancia se supone o se conoce, y la iluminancia sobre un plano horizontal procedente de un hemisferio de este cielo sin obstáculos. De ambas iluminancias se excluye la contribución de la luz solar directa*" [233].

En la definición de este factor no se especifica un modelo de cielo, sino que se indica que se supone o conoce la *distribución de luminancias*, excluyendo la contribución de la *luz solar directa*, por lo que se puede dar el caso de que se calcule bajo situaciones irreales de cielos despejados sin la presencia del Sol.

La norma '*UNE -EN 15193*', por tanto, establece una forma de cálculo del *DF* en base a las condiciones geométricas del espacio y las obstrucciones del entorno. No intervienen las condiciones climáticas locales, tan sólo se tiene en cuenta la latitud para la determinación del *FD* de los espacios iluminados con lucernarios.

Esta norma establece cuatro rangos diferentes para clasificar la apariencia de los espacios en base a su *DF*. Además, tiene en cuenta la reducción de la iluminación natural debido a la presencia de elementos de oscurecimiento, reflejada a la hora de obtener la clasificación del espacio.

Acceso a la luz natural o <i>Factor de Iluminación Natural</i>		Clasificación
Sin elementos de oscurecimiento	Con elementos de oscurecimiento	
>6%	>3%	Fuerte
6% - 4%	3% - 2%	Media
4% - 2%	2% - 1%	Débil
< 2%	< 1%	Ninguna

Tabla 9: clasificación de la apariencia de los espacios en función de su *DF*[232].

Si bien este método está destinado a la consideración de la *eficiencia energética* de la instalación de iluminación artificial, cuando se trata de evaluar la *eficiencia energética* de un edificio, la norma '*UNE -EN 15251*' [234], que se basa en la anterior, establece, al igual que el '*Documento Básico HE3*' del '*Código Técnico de la Edificación*' de España, que la luz en el interior de las viviendas y la iluminación de emergencia se excluyen del ámbito de aplicación.

El primer salto hacia la normalización de los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)* se ha realizado bajo la supervisión del grupo de trabajo sobre indicadores de iluminación natural de la *IESNA*, en base al trabajo realizado por *Heschong Mahone Group Inc.* [125], para la *Comisión de la Energía de California*.

El estándar voluntario '*IES LM-83-12*' especifica un método para el cálculo de la *Autonomía Espacial de Luz Natural (sDA)* y la *Exposición Solar Anual (ASE)* [126], estableciendo criterios para ambos indicadores.

El criterio para una adecuada iluminación natural utilizando estos indicadores establece como preferible alcanzar una *Autonomía Espacial* en *más del 75% del área de trabajo*, aunque se considera aceptable y se aceptan porcentajes *entre el 55% y el 75%*. Sin embargo este criterio no establece límites superiores que pudieran prevenir el discomfort lumínico por exceso de iluminación. Respecto a la *Exposición Solar Anual*, se recomienda tener como *máximo el 10 % del área de trabajo*.

### 2.3.2.2 Requisito de Habitabilidad

---

Tal como se ha comentado antes, pese que se ha demostrado la efectividad de los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)*, el criterio de iluminación natural que permanece en la mayoría de las guías y recomendaciones se basa en el *Factor de Iluminación Natural (DF)* [117], aunque algunas también vienen expresadas mediante la obtención de un determinado *nivel de iluminación mínimo* [50] [220].

La *Servidumbre de Luz Natural (Rights of Light)*, nacida en ámbito británico, se entiende como la base de toda la normativa posterior sobre iluminación natural, presentando métodos de cálculo y estableciendo criterios de interpretación de los requerimientos.

En principio, el cálculo de los valores de *DF*, necesarios para la evaluación de las condiciones de iluminación natural para determinar la infracción de la servidumbre, se realizaba punto a punto. Posteriormente, con la evolución de la tecnología computacional, el cálculo se extendió a todos los puntos del plano de trabajo.

Por tanto, a la hora de establecer criterios sobre el *Factor de Iluminación Natural* de un espacio, establecido en muchos documentos, se suele recurrir al análisis estadístico de los valores obtenidos en dichos puntos, siendo el indicador más habitual el valor medio del conjunto de valores.

La existencia de diversos tipos de cielo estandarizados ha llevado a que en algunas normativas se permita el cálculo del *Factor de Iluminación Natural* utilizando bien el *Cielo Nublado Estándar CIE* o bien el *Cielo Uniforme* e incluso con el *Cielo Despejado*, eliminando la presencia del Sol, situación totalmente irreal.

Sin embargo, pese a la vinculación entre el valor de *DF* con el *nivel de iluminación* que se obtiene en el espacio, esta conversión parece que ha caído en el olvido. El valor de *DF*, que se estableció como un objetivo a cumplir, ya no representa un *nivel de iluminación difusa*.

Por tanto, el valor de *DF* ya no es un indicador objetivo, porque ha perdido su vinculación con las condiciones objetivas medibles de iluminación del espacio, con las condiciones exteriores de la ubicación en la que se realiza el estudio y porque la posibilidad que se ofrece para que se calcule bajo condiciones de cielo distintas a las lógicamente posibles, desvirtúa el valor de iluminancia que representa.

Tradicionalmente el estudio de la iluminación natural de los espacios se realiza mediante la obtención de la distribución de valores *DF* en el plano de trabajo complementado con el análisis de



las *horas de soleamiento* en determinados puntos. Esta práctica se traduce en la existencia de documentos normativos relativos a las condiciones de iluminación natural y determinaciones sobre las condiciones de soleamiento de los espacios.

### **Servidumbre de Luz Natural (Rights of Light)**

Esta servidumbre de la legislación británica, aprobada por el *Parlamento Británico* bajo la '*Ley de Prescripción de 1832*' (*Prescription Act*), proporciona al propietario de un edificio con ventanas el derecho a mantener su nivel de iluminación natural si demuestra una antigüedad de dichos niveles de, al menos, 20 años [21]. Su definición actual se basa en la '*Ley de Luz Antigua*' (*Ancient Lights law*). Esta ley describe el método en que se adquiere esta servidumbre, modificando la '*Ley Común de 1189*' en la que se asumían derechos prescriptivos continuados, exponiendo que:

*“Cuando el acceso y uso de la luz natural de cualquier vivienda, tienda, u otro edificio se ha disfrutado por un periodo de veinte años ininterrumpidamente, el derecho a la misma, se considerará absoluta e irrevocable, siendo cualquier uso o práctica local contraria a lo establecido, a menos que se manifieste que la misma fue disfrutada con algún tipo de consentimiento o acuerdo expreso que hayan sido dictados al efecto por escritura.”*

El propietario de una *servidumbre de luz natural (rights of light)* no tiene un derecho de propiedad sobre toda la luz que entra por su ventana, sólo de una determinada cantidad de luz. Por lo que este propietario puede ver reducidos sus niveles de iluminación natural sin que se infrinja su derecho. Para que esto suceda, el propietario tiene que demostrar que la cantidad de luz natural que le queda tras el levantamiento de una obstrucción es menor que el nivel reconocido por ley. Esta cantidad reconocida se define como *“una cantidad suficiente de luz de acuerdo con las nociones ordinarias de la humanidad”* y *“suficiente luz, de acuerdo con las nociones ordinarias, para el uso confortable o benéfico del edificio en cuestión”*.

La principal dificultad reside en la puesta en práctica de esta ley ya que el concepto de «suficiencia», juzgada de acuerdo a las nociones ordinarias de la humanidad es difícilmente aplicable a la realidad de una situación específica.

Fue *P.J. Waldram* quien estableció la metodología a seguir para evaluar las modificaciones en la iluminación natural y con ello, la valoración de los términos del derecho a la luz.

*P.J. Waldram*, en vez de medir los niveles de iluminación interior en términos absolutos en un determinado momento, propuso que debía medirse como la relación entre el total de iluminación disponible simultáneamente con la cúpula celeste sin ningún tipo de obstrucciones (1909). Esta medida es lo que se conoce actualmente como *Factor de Cielo (Sky Factor -SF)*, concepto previo a la definición del *Factor de Iluminación Natural*.

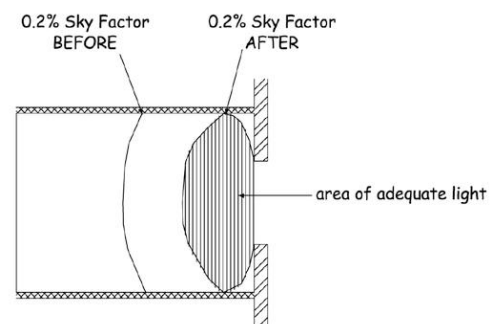


Figura 130: Determinación de la reducción de la superficie iluminada debido a la presencia de obstrucciones [235].

En base a sus investigaciones, *Waldram* sugirió que las personas corrientes necesitan una *candela* de iluminancia (aprox. 10 lux)<sup>6</sup> para leer y otras tareas que requirieran discriminación visual. Este valor correspondía con un valor de *Factor de Cielo* de 0'2% (1923). *Waldram* describe este valor como el nivel en el cual “*una persona media razonable podría quejarse consistentemente*” por lo que a este valor se le conoce como el punto de queja. Este valor se convirtió en la trasposición del concepto de «luz suficiente» a los casos concretos [57].

Esta servidumbre se formalizó en la '*Ley de la Servidumbre de Luz*' (*Rights of Light Act*) de 1959 [64] donde se enmienda la ley relacionada con las *servidumbres de luz*, y cualquier fin relacionado con la misma. Para considerar si se infringe la servidumbre, “*el área con un Factor de Cielo mayor o igual al 0'2% no debe ser menor al 50% de la superficie de la habitación tras el levantamiento de la obstrucción*” [21] [235].

Mediante esta ley, por tanto, se vincula una medida relativa de iluminación natural con el espacio iluminado. Estos dos parámetros, un determinado valor de iluminación y una determinada superficie del espacio, se mantienen como uno de los medios más habituales para establecer los requisitos de iluminación de los espacios.

Esta servidumbre no es un aspecto legislativo exclusivo del Reino Unido, donde nace, sino que ha trascendido al panorama internacional, siendo una servidumbre vigente también en Suiza, Irlanda, Suecia, China (para algunos usos), Australia y Bélgica, entre otros países [236]. Sin embargo, parece que no existe ningún derecho adquirido respecto al *soleamiento*.

### **Requisitos a nivel nacional o estatal**

Tal como se ha comentado, la evolución del cálculo computacional ha permitido el cálculo del valor de *DF* en todos los puntos del plano de trabajo, lo que ha llevado a establecer como indicador habitual el valor medio de los resultados obtenidos en dichos puntos, como consecuencia de los requisitos de la '*Ley de la Servidumbre de Luz*' de 1959.

En general, la normativa existente establece criterios sobre el valor del *Factor de Iluminación Natural Medio* ( $DF_{ave}$ ) o en la mínima superficie relativa de la ventana respecto al suelo (*Window-to-Floor ratio -WFR*) (y/o de la superficie de la pared - *Window-to-Wall ratio, WWR*). Otros países, sin embargo, carecen de requerimientos legales, especificando como objetivo legal la obtención de una iluminación natural «adecuada y/o suficiente», sin dar indicaciones sobre su valoración [236].

La importancia de la iluminación natural para el desarrollo de las tareas visuales no sólo queda recogida en normativa específica sino también está presente a la hora de regular las condiciones de iluminación artificial. Ya en 1915, cuando se publica en Estados Unidos el primer '*Código de Iluminación en Fábricas, Talleres y Otros espacios de trabajo*', a la que siguieron otros códigos sectoriales [54], se especifica:

*“La intensidad de los requerimientos de iluminación natural son mayores que para la iluminación artificial debido a que las condiciones físicas del ojo a lo largo de las horas diurnas son tales que requieren mayores intensidades de luz natural para una visión satisfactoria que los requeridos bajo un sistema de iluminación artificial ordinario bien diseñado.”*

---

<sup>6</sup> La *candela-pie* o *foot-candle* (fc) es la medida de la iluminancia y emitancia luminosa del sistema imperial de medida, de aplicación en Estados Unidos y Reino Unido. Mide el flujo luminoso por unidad de área, siendo la iluminación que recibe una superficie equivalente a una *candela* y a un *pie* de distancia. Equivale a 10.764 lux

La visión sistémica de la luz natural ha dado lugar al desarrollo de documentos normativos donde los requisitos de iluminación natural se expresan en forma de niveles de iluminación, pero sin tener en cuenta la alta variabilidad y la incontabilidad de la luz diurna [237]. En los Estados Unidos, por ejemplo, el '*Código Nacional de Edificación BOCA*' (*Building Officials Code Administrators National Building Code*, 1990) estipula, que salvo para los espacios de paso en planta baja o en los atrios, que:

*“la normativa para la iluminación natural para todas las estancia habitables y ocupables debe estar basada en una iluminación de 250 fc (2691 lux) en un plano vertical adyacente al exterior del dispositivo de transmisión de luz en la pared de la envolvente y debe ser adecuada para proporcionar un nivel de iluminación medio de 6 fc (64.58 lux) en la superficie de la habitación a una altura sobre el nivel del suelo de 30 pulgadas (762 mm).”*

Estos niveles de iluminación pueden ser proporcionados también mediante la luz eléctrica, que, ante la imposibilidad de asegurar que se obtengan con luz natural, se convierte en la fuente principal de iluminación. Sin embargo en otros países se definen unos *niveles mínimos de iluminación natural*. En Canadá, por ejemplo, *se recomienda un nivel de iluminación natural medio de 200 lux en el perímetro del espacio de oficina a una profundidad de 3 metros para el 80% de las horas de trabajo, desde las 8h a las 17h*. Esta recomendación, como puede observarse, está muy próxima a la definición de *Autonomía de Luz Natural (DA)*, propuesta por *Reinhart*.

### Requisitos relativos a la Superficie de ventana

En Europa, se tiene constancia de la aparición, en la segunda mitad del siglo XX, de diversas normativas nacionales en las que ya se especifica la superficie mínima de ventana [Figura 131] como medio para establecer unas *condiciones mínimas de iluminación natural* en edificios residenciales y en aquellos de otros usos [238]. Sin embargo, el límite superior [Figura 132] no viene establecido por cuestiones de confort visual sino por cuestiones térmicas, expresada la superficie máxima de ventana como el coeficiente de transmisión total de la energía solar (conocido actualmente como *Factor Solar -g<sub>t</sub>*) de la misma, delimitando de este modo el rango admisible según el tipo de edificio, expresado generalmente como el porcentaje de superficie respecto a la superficie de fachada (*WWR*).

En Bélgica se propusieron tres *porcentajes mínimos de ventana* siendo del *20% para edificios de oficina, 12'5% para ventanas verticales en edificios residenciales y del 8% de la superficie del suelo* para ventanas horizontales en edificios residenciales (*Model Building Requirements, 2nd part. Association of the Belgian Municipalities*, 1978). Sin embargo, la inclusión de estos indicadores en las ordenanzas municipales era voluntaria, por lo que se podía modificar o no aceptar estos valores como requisitos para obtener la licencia del edificio.

Respecto a la superficie máxima, ésta sólo se delimita para los edificios públicos. Para ello es necesario calcular el parámetro «I», que es la relación entre la superficie efectiva para almacenar calor y la superficie de suelo. Esta superficie efectiva se obtiene de la suma de las superficies de todas las paredes a la que se le aplica un factor reductor en función de la solución constructiva de las mismas. Una vez calculado el parámetro «I» se obtiene la transmitancia solar máxima y el *máximo valor de WFR, variando entre el 100% y el 15%*, para las situaciones más rigurosas.

En Alemania, la legislación sobre iluminación natural se remonta hasta 1935 con la publicación de la norma '*DIN 5034*' [60] y sus actualizaciones en 1959 y 1969. Esta norma fija la superficie mínima de ventana proporcionando valores porcentuales respecto a la superficie de la pared que la contiene, a la superficie de suelo o al volumen del espacio (*WWR, WFR o WVR*) [237].

En la Figura 131 se especifica la superficie mínima de ventana calculada en base a la geometría de la habitación (ancho x largo x alto), siendo para habitaciones de edificios residenciales sin presencia de obstrucciones:

- D1:  $2.8 \times 3.5 \times 6.0 \text{ m}^3$ , obteniendo una *superficie mínima de ventana del 24%*
- D2:  $2.8 \times 6.0 \times 3.5 \text{ m}^3$ , obteniendo una *superficie mínima de ventana del 16%*

Para el caso en que hubiera obstrucciones se requieren mayores porcentajes de superficie de ventana. En la actualización de 1985 se especifica, sobre las condiciones de la ventana, que *la altura mínima debe ser de 1'30 m, con una anchura del 55% de la pared que la contiene, dando lugar a un 30% de la superficie de la pared WWR, 10% de la superficie del suelo WFR y 7% del volumen de la habitación WVR.*

La normativa alemana establece una serie de recomendaciones sobre la superficie máxima de ventana en función del *Factor Solar* de la misma, de la superficie de fachada y de la presencia de ventilación natural en el espacio. Las curvas D1 y D2 que se presentan en la Figura 132 son válidas para valores de *Factor Solar total* entre 0'2 y 0'8 (*DIN 4108 Wärmeschutz im Hochbau -Thermal insulation in building construction*, 1981).

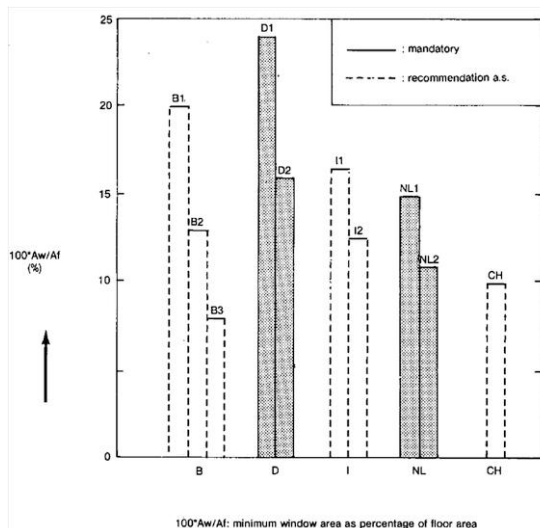


Figura 131: Superficie mínima de ventana expresada en porcentaje respecto a superficie de suelo [238].

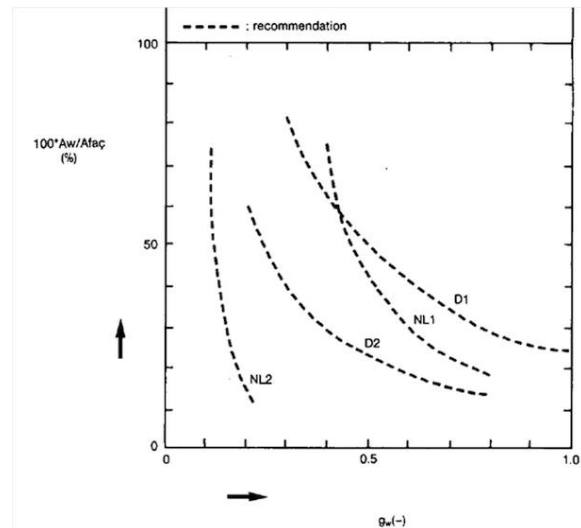


Figura 132: Superficie máxima de ventana en función del Factor Solar [238].

B= Bélgica, I= Italia, CH= Suiza, D= Alemania, NL= Países Bajos

En Italia, el texto legislativo donde se establecen los criterios para evaluar las condiciones de iluminación natural en los edificios (*Circ. No. 3151, Ministry of Public Works: Criteria for evaluating thermal, hygrometric, ventilation and daylighting performance in buildings*, 1967), recomienda, para edificios residenciales, *porcentajes mínimos de ventana entre el 16% y el 12'5% de la superficie del suelo*. No existen recomendaciones de superficie máxima, sino sobre la presencia de protección solar en la ventana, de forma que *el calor que entre por la ventana sea el 30% del que entraría sin dicha protección.*

En los Países Bajos (*Dagverlichting van woningen*, 1953) se exige una *superficie mínima de ventana del 15% para los salones de las viviendas y 11% de la superficie de suelo de las otras habitaciones* de un edificio residencial. En el caso de que hubiera obstrucciones se exige una mayor superficie, así como también a las ventanas con una altura de alféizar menor a 0'85 m. El límite superior viene expresado para edificios de oficinas en función del tipo de acristalamiento, la

presencia de protección solar (interior), la masa térmica de las superficies y del movimiento del aire en la habitación.

Las '*Normas Suizas Comunitarias de Edificación*' recomiendan, sin embargo, un *valor genérico de superficie de ventana del 10% de la superficie de suelo*, pero este valor varía según la normativa regional. Tampoco se tiene constancia de un valor máximo de superficie de ventana [238]. Este mismo valor del 10% también es un valor requerido en el '*Código de Edificación de Australia*' para los espacios habitables de los edificios residenciales [237]. Sin embargo el '*Código de Trabajo*' francés indica como obligatoria la presencia de ventanas en el entorno de trabajo al nivel de los ojos para tener visión del exterior; además, las áreas de trabajo deben estar protegidas frente al deslumbramiento solar y que *el 25% de la fachada debe estar acristalada* [239]. Además se exige un *nivel mínimo de iluminación en las áreas de trabajo de 120 lux*, por medios naturales o artificiales.

En Japón, la '*Ley de Normalización de la Edificación*' establecida en 1950 [221] proporciona regulaciones sobre soleamiento e iluminación natural como restricciones en la altura y la forma de los edificios y los requisitos para los huecos.

Las determinaciones sobre iluminación natural se introdujeron en primer lugar debido a razones sanitarias de los espacios habitables. En estos espacios, la normativa determina que *debe haber ventanas o aperturas de iluminación natural sustitutivas y que la relación del área efectiva de iluminación natural respecto a la superficie del suelo de la habitación no debe ser menor de ciertos valores*. Esta área efectiva es resultado de la reducción de la superficie de los huecos de iluminación natural debido a las condiciones exteriores.

Tipo de edificio	Tipo de habitación	$\frac{\text{Sup Ventana}}{\text{Sup Suelo}}$	Anotaciones
Casas, edificios de apartamentos	Espacios habitables	1/7	Habitaciones utilizadas en las viviendas
	Salas, pabellones	1/7	
Hospitales y clínicas	Consultas y espera	1/10	Incluidos espacios habitables utilizadas por los pacientes para conversar, recreo u otros propósitos similares
		1/5	
Guarderías, escuela elemental, primaria, secundaria	Aulas	1/7	1.- Aulas con una instalación de iluminación artificial que proporciona 200 o más lux en el plano horizontal a 50 cm sobre el suelo 2.- La porción del área efectiva de ventana por encima del plano de trabajo (50 cm sobre el suelo) es de 1/7 o más de la superficie del suelo
		1/10	Además del punto 1 anterior, las aulas de música o las aulas audiovisuales con equipamiento para ventilación conforme a normativa (excluyendo las guarderías)
		1/10	
	Despachos y sala de profesores	1/10	

Tabla 10: Requisitos de iluminación natural en la normativa japonesa [221].

Esta condición sobre iluminación natural en los edificios no se aplica a todos los edificios, sino que se limita a los espacios habitables de los edificios residenciales, escuelas, hospitales, clínicas y otros edificios de similar uso. Los edificios de servicios como oficinas y comercios quedan excluidos de su aplicación [237].

Sin embargo, estas regulaciones se han relajado gradualmente con el crecimiento urbano y han sufrido numerosos cambios y adendas con el paso del tiempo, por lo que el *Instituto Arquitectónico de Japón (Architectural Institute of Japan -AIJ)* ha publicado en 2010 un estándar para el diseño y el mantenimiento de las ventanas y huecos para la iluminación interior y el ambiente visual en aras de prevenir la relajación de las normas sobre iluminación natural y el soleamiento. Este estándar proporciona recomendaciones sobre valores de *Factor de Iluminación Natural*, incluyendo el método de cálculo y medición, la proporción relativa de superficie acristalada, la uniformidad y la direccionalidad de la luz natural para asegurar un buen comportamiento del ambiente luminoso y ambiental en los interiores.

En Estados Unidos, el '*Código Nacional de Edificación*' (*BOCA National Building Code*, 1990) especifica que "*cada habitación o espacio destinado a la ocupación humana debe tener una superficie de ventana exterior de no menos de 8% de la superficie de suelo. La iluminación natural debe proporcionarse mediante superficies acristaladas que abren hacia patios o jardines o a otros medios aprobados. Igualmente, en aquellas habitaciones o espacios provistos de iluminación natural a través de una habitación adyacente, la apertura en la pared separadora de dichos espacios no debe ser menor del 8% de la superficie total de la habitación*" [237].

La '*Ley de Edificación*' danesa [68], de 2010 y actualizada en enero de 2013, establece que "*las habitaciones de trabajo, las habitaciones ocupadas de las instituciones, las aulas, los comedores y las habitaciones habitables y las cocinas deben tener suficiente iluminación natural para estar bien iluminadas. Las ventanas deben hacerse, ubicarse y, cuando sea apropiado, apantallarse de forma que la luz solar directa que las atraviesa no cause sobrecalentamiento en las habitaciones, de forma que se elimine esta molestia debido a la ganancia solar directa*".

Para obtener la suficiente iluminación natural se establece un *porcentaje mínimo de superficie acristalada respecto a la superficie del suelo de la habitación, siendo del 10% para huecos verticales y del 7% para huecos horizontales*, considerando que la transmitancia visible del vidrio no es menor de 0'75.

En España se pueden encontrar valores relativos a la *superficie de ventana* en las normativas sectoriales. Por ejemplo, en la legislación sobre las *Viviendas de Protección Oficial* se establece que:

"*Todas las piezas habitables deben disponer de iluminación natural desde un espacio abierto exterior o patio de luces, excepto los cuartos de aseo y las dependencias auxiliares. Los huecos de iluminación deben tener una dimensión mínima superior a 1/10 de la superficie útil de la pieza, con huecos practicables para ventilación de al menos 1/3 de la dimensión mínima. Los patios deberán poseer las dimensiones adecuadas para permitir, de forma eficaz, la iluminación y ventilación de las dependencias que den a ellos.*" Sin embargo, para determinar las «dimensiones adecuadas» de los patios tendremos que buscarlas en las normativas locales.

Esta misma exigencia se refleja en las condiciones mínimas de habitabilidad y funcionalidad de la '*Normativa Directora en relación a las Condiciones de Habitabilidad para la Regularización de las Edificaciones y Asentamientos Existentes en Suelo No Urbanizable en la Comunidad Autónoma de Andalucía*' [240].

### Requisitos relativos al *Factor de Iluminación Natural*

En la normativa alemana (*DIN 5034*) estos requerimientos se han ido actualizando en base a investigaciones de campo y en modelos a escala que han ido modificando los requisitos de *Factor de Iluminación Natural (DF)* y de *niveles de iluminación natural*. Además es de las pocas normativas

que establecen requisitos sobre *horas de soleamiento* en viviendas. En base a dichas investigaciones se obtuvo que *el Factor de Iluminación Natural Medio ( $DF_{ave}$ ) debe ser al menos de 0'9% en los espacios de salón de viviendas* medidos en dos puntos de referencia bajo condiciones de cielo nublado [60].

Cabe señalar que ya en la versión de 1982 se establece un procedimiento para calcular el número de horas en un cierto periodo del año en el que la iluminancia debido a fuentes naturales excede un determinado valor, establecido en función de los requerimientos lumínicos de la habitación de estudio [60]. Por tanto, ya se estaban sentando las bases para la definición y el procedimiento de cálculo de la *Autonomía de Luz Natural (DA)*.

En Italia, la normativa relativa a los edificios residenciales públicos especifica un *valor mínimo de DF de 5%*. Para edificios no residenciales, fundamentalmente escuelas (*O.M. 18/1 2/1975: Technical norms concerning educational buildings*, 1975) y hospitales (*Circ. No. 13011, Ministry of Public Works: Technical requirements for hospitals. Thermal, hygrometric, ventilation and daylighting performance*, 1974), se especifican diferentes valores de *DF* para diferentes tipos de habitaciones [238].

La normativa británica ha tenido una gran tradición respecto a la regulación del *DF* en cuanto es la base de cálculo para la evaluación de la *Servidumbre de Luz Natural*, sufriendo modificaciones desde la determinación de los primeros requisitos. Actualmente, en la norma '*BS 8206-2:2008*' sobre iluminación natural [119] se dice que "*si no se va a utilizar normalmente la iluminación artificial durante el día, el Factor de Iluminación Natural medio no debe ser menor del 5%; si la iluminación artificial se va a utilizar durante el día, el Factor de Iluminación Natural medio no debe ser menor del 2% si se quiere que el espacio aparente estar iluminado naturalmente*". Para ello, se propone la siguiente fórmula:

$$ADF = (\tau_{vis} M A_w \theta) / A(1-R^2)$$

Ecuación 22: *Factor de Iluminación Natural Medio (Average Daylight Factor)*

Donde interviene la transmitancia visible o transparencia del acristalamiento ( $\tau_{vis}$ ), el factor de mantenimiento de la habitación (*M*), la superficie de acristalamiento ( $A_w$ ), el ángulo de cielo visible ( $\theta$ ), el área total de las superficies de la habitación y su coeficiente de reflexión medio (*R*). Para el caso de los edificios residenciales, la norma establece las siguientes recomendaciones de *Factor de Iluminación Natural Medio -ADF*:

Habitación	Porcentaje
Cocina	2%
Salas de estar	1.5%
Dormitorios	1%

Tabla 11: Recomendaciones de *ADF* en viviendas dadas por *BRE* [114].

En la versión de 1992, además se establece un criterio de *uniformidad* basado en la geometría y las reflectancias de la habitación y se menosprecia la parte de la habitación fuera de la *línea sin cielo* [46].

El '*Manual de Iluminación*' de la *IESNA*, cuyas determinaciones se incluyen las normativas estatales de los Estados Unidos, también establece como *límites los valores de 5% y 2% para el Factor de Iluminación Natural Medio ( $DF_{ave}$ )*, prácticamente en los mismos términos que la norma británica.

La guía de aplicación de la '*ley de edificación danesa*', de 2010 y actualizada en enero de 2013 [68], especifica un *valor mínimo de DF del 2% en la mitad del área de la habitación o del área*

*de trabajo* para considerar que se tiene una adecuada iluminación natural. Para realizar el cálculo se debe tener en cuenta el diseño de las ventanas, la transmitancia visible de la lámina de vidrio y la naturaleza de la habitación y sus alrededores.

En Francia, los valores de *DF* no se especifican en las regulaciones, pero el comportamiento de la luz natural es indirectamente un componente de los objetivos máximos de consumo energético, en relación al consumo anual de energía primaria de un edificio [219]. La etiqueta energética «Alta calidad ambiental» expresa algunas especificaciones sobre el *Factor de Iluminación Natural* y propone tres niveles:

- *DF > 1.5% para el 80% de la superficie del edificio utilizado regularmente*
- *DF > 2%*
- *DF > 2.5%*

En general, para los climas con gran abundancia de días nublados, estos límites llevan asociados una interpretación de cómo será la apariencia de la habitación. Si el *Factor de Iluminación Natural Medio* es:

- Menor del 2%:
  - La habitación parece sombría sólo con la luz natural
  - Normalmente, se necesita iluminación artificial durante todo el día
  - La iluminación artificial domina la apariencia del espacio durante el día
- Entre el 2% y el 5%
  - Las ventanas dan una apariencia predominantemente de estar iluminado naturalmente pero se necesita una iluminación artificial suplementaria
  - Se entiende como el rango óptimo de iluminación natural teniendo en cuenta el consumo global de energía del espacio
- Mayor del 5%
  - La apariencia de la habitación se ve gobernada por la iluminación natural
  - Apenas se necesita iluminación artificial durante el día
  - Aparecen problemas térmicos debido a la presencia de grandes ventanas

Sin embargo, tal como *J. Mardaljevic* apunta [220], el valor medio no proporciona realmente ningún dato de la distribución de la luz en el plano que no pueda ofrecer la mediana de los valores. Además, el valor medio puede inducir al engaño cuando se aplica a la distribución de valores en un plano, especialmente en el caso de espacio iluminados lateralmente con grandes diferencias desde las zonas más próximas a la ventana hasta las más alejadas a la misma.

Para realizar el cálculo del *DF* se establece el *Cielo Nublado Estándar CIE* como condición de cielo, sin embargo otras normas basan sus criterios de *DF* sobre cálculos que utilizan el *Cielo Uniforme*, como es el caso de Australia y Nueva Zelanda [220]. Pero la opción de utilizar el *Cielo Uniforme* produce mayores valores de *DF* que el *Cielo Nublado Estándar CIE* debido a que, en el cielo nublado, la luminancia de la bóveda celeste se concentra alrededor del cenit. Luego, para el mismo requerimiento de *DF*, las condiciones de diseño arquitectónico y de cumplimiento serán distintas en función del tipo de cielo elegido para realizar el cálculo.

En el caso de España, la normativa nacional no recoge criterios sobre iluminación natural; no se mencionan valores de *Factor de Iluminación Natural* mínimos en el reciente '*Código Técnico de la*



*Edificación'* ni en sus revisiones, aunque se hace mención de la regulación de la iluminación artificial [241] para que tenga en cuenta la iluminación natural pero sin indicar valores sobre la misma.

Sin embargo, sí existen guías, como la publicada por el *IDAE* que indica valores de *DF* para las estancias principales de edificios de diferentes usos [27]. En ausencia de legislación propia, esta guía permanece como referente en la consideración de la iluminación natural en los edificios españoles.

### Requisitos relativos al Soleamiento

En los climas fríos al menos, el soleamiento se ha visto como uno de los mayores requisitos en los edificios de vivienda, especialmente tras la masificación de las ciudades como consecuencia de la Revolución Industrial [1]. Las determinaciones legislativas sobre el acceso solar, y con ello el soleamiento, normalmente forma parte de las ordenanzas municipales y, por tanto, varían en función de la zonificación de la ciudad, atendiendo a múltiples factores. Estos requisitos se traducen en un adecuado planeamiento urbano que permita unas determinadas *horas de soleamiento (sh)* en las habitaciones. Sin embargo, por cuestiones de salubridad, sí que existen algunas recomendaciones extendidas a lo largo del mundo sobre el acceso solar [237].

En 1912, *William Atkinson* propuso determinadas geometrías para limitar la altura de los edificios en áreas urbanas de forma que asegurasen la exposición a la luz natural en las calles mediante la definición de un límite permisible para la envolvente de los edificios. Basándose en un concepto similar, las ordenanzas de 1916 para la ciudad de Nueva York fueron las primeras disposiciones municipales para asegurar un nivel mínimo de acceso solar en las calles [3]. De esta forma se establecía la masa máxima edificatoria para determinadas zonas de la ciudad, dando lugar a edificios «con forma de tarta de boda». Desde entonces, esta ordenanza ha sufrido varias alteraciones por motivos políticos y económicos. En 1980, la revisión de la zonificación de Nueva York apostaba por métodos de evaluación gráfica para obtener la cantidad de cielo que un nuevo edificio obstruía.

Mientras las ordenanzas americanas se centran en la limitación de la masa edificada, en Europa, las recomendaciones y normas se centran en la definición de las *horas de soleamiento* que se reciben en las habitaciones según diversas localidades.

*P. Littlefair* señala cuatro criterios diferentes, obtenidos a partir de encuestas a usuarios en distintos países: Países Bajos (1965), Suiza (1976), Inglaterra (principios de 1970) y Alemania (1982). Estas consultas han servido para establecer recomendaciones, pero también para el establecimiento de requisitos normativos [46].

La encuesta británica no sólo abarcó viviendas, sino también escuelas, oficinas y hospitales, sugiriendo un criterio de *horas probables de soleamiento (sh<sub>p</sub>)* a lo largo del año. Las *horas probables de soleamiento* no consideran la posible obstrucción de las nubes, sino que representa el *soleamiento* que entra en un edificio en un año típico. Como resultado de este estudio se obtuvo una recomendación de *400-500 horas de soleamiento anual* dependiendo del tipo de habitación. Estas horas, además, deben repartirse en, al menos, *seis meses del año*.

Estas recomendaciones se incorporaron a la normativa nacional en forma de *porcentaje anual de horas probables de soleamiento*. La norma británica indica, por tanto, que “*los interiores en los que los ocupantes esperan una razonable entrada de soleamiento deben recibir al menos el 25% de las horas probables de soleamiento; al menos el 5% se debe recibir durante los meses de invierno (desde el 23 de Septiembre hasta el 21 de Marzo)*” siendo las *horas probables de soleamiento* la

media a largo plazo del número de horas durante el año en las que se recibiría *soleamiento* en el terreno de la localización sin presencia de obstrucciones [119] [114].

El estudio realizado en Alemania, dio lugar a una recomendación de *al menos 4 horas de soleamiento posible en el centro de la ventana durante el 20 de Marzo*, que se incorporó al estándar nacional *'DIN 5034'*.

Del mismo modo en que las encuestas determinaron ciertos criterios sobre las condiciones de soleamiento en Alemania, el estudio sobre las condiciones de iluminación natural y de soleamiento en zonas urbanas representativas de Curitiba (Brasil) dio lugar al establecimiento de criterios en cuanto al diseño urbano. Como resultado, *se fijó la relación de H/6 respecto a la distancia de los edificios enfrentados, siendo H la altura del edificio*, lo cual también suponía una mejora en cuanto a la *radiación solar incidente* en los edificios respecto a la situación anterior [242].

En 2011 el *'Manual BRE sobre planeamiento urbano para iluminación natural y soleamiento'* [114] además proporciona criterios para los espacios abiertos donde se requiera soleamiento, como parques, jardines, etc. El documento establece que *“para un adecuado soleamiento a lo largo del año, al menos la mitad de un jardín o de un área de descanso debe recibir al menos dos horas de soleamiento el 21 de Marzo”*. La pérdida de soleamiento se considera notable si, a causa de nuevos desarrollos constructivos, dicho jardín o área de esparcimiento recibe menos del 80% de las citadas dos horas.

En California, se exige para las zonas de costa del Sur y en el interior de las zonas del Norte que *las ventanas orientadas al Sur (a mediodía) y al Oeste (a las 17h) estén completamente en sombra el 21 de Agosto, pero totalmente soleadas el 21 de Diciembre (al mediodía las ventanas Sur, a las 15h las ventanas Oeste) o que tengan elementos de protección solar variable con un coeficiente máximo de sombra de 0'36 (con una transmitancia solar de 0'3)*, sin que existan requerimientos para las zonas de costa del Norte de California (*California Administrative Code*) [238].

En Japón [221], las condiciones de soleamiento restringen la altura de la edificación según distritos en función de la anchura del vial frente al edificio y los materiales estructurales. En base a esto, *la máxima altura de la edificación era de 20 m en los distritos residenciales y de 31 m en otros distritos*. Esta restricción también se conoció como la «restricción de la línea oblicua» y se estableció para evitar que los nuevos desarrollos obstaculizaran el acceso solar de los edificios del entorno.

Los estándares de diseño establecidos en la década de 1950 recomendaban *4 horas o más de soleamiento en los espacios habitables principales durante el solsticio de invierno*. Pero estas recomendaciones se fueron perdiendo a medida que las ciudades japonesas se fueron densificando.

Como consecuencia de esta densificación se estableció «el derecho al soleamiento» basado en un veredicto de la Corte Suprema en 1972. Ésta dictaminó que *“el soleamiento y la ventilación de las casas son los beneficios necesarios para una vida confortable y saludable y son objeto de protección legal”*. A consecuencia de este veredicto se añadieron, en 1976, regulaciones específicas relativas al sombreado de la ley de 1950 [237].

Tal como señala *P. Littlefair* [46], el criterio de *horas probables de soleamiento anual* responde mejor a los requisitos del norte de Europa, ya que asegura no sólo condiciones de soleamiento en invierno sino también en verano. Sin embargo, para los países más cálidos, del sur y centro de Europa, el criterio de determinadas horas en una fecha determinada, asegura unas condiciones mínimas de soleamiento en invierno sin establecer ningún requisito en verano, donde la entrada de Sol en los espacios provoca mayores problemas.

## Normativa local en España

En España, además de encontrar algunas disposiciones generales en los textos legislativos sectoriales, generalmente sobre la superficie de ventana, son las *'Ordenanzas Municipales de Edificación'* las que regulan los aspectos morfológicos, entre otros, en base a las disposiciones sectoriales reguladoras de la seguridad, habitabilidad y calidad de las edificaciones. En las *'Normas Urbanísticas del Plan General de Ordenación Urbana'* de las ciudades españolas, de forma general, se establecen determinados criterios asociados a las condiciones generales que deben cumplir los edificios en función de su uso, así como a las condiciones de las edificaciones, que si bien en algunos casos no hacen relación directa a las condiciones de iluminación natural o de soleamiento, establecen parámetros que determinan las características de acceso solar de los edificios.

### Condiciones generales de la edificación

Las condiciones generales de la edificación establecen las limitaciones físicas a que han de ajustarse las edificaciones por sus propias características y por su relación con el entorno, definiendo la posición y volumetría de la masa construida de la ciudad, es decir, determinando indirectamente las condiciones de acceso solar así como el ángulo de obstrucción máximo.

En el caso de Sevilla [227] las condiciones de posición de los edificios y la anchura de vial viene grafada en los *'Planos de Ordenación Detallada'*; la altura de la edificación también viene establecida por el *Plan General*, pero si éste no la fija expresamente "*las nuevas construcciones, cuando sea obligatoria su alineación a vial, no podrán guardar una relación entre la altura de cornisa y ancho de la calle superior a la proporción dos a uno (2:1)*".

$$\tan(A_h) = H / S \rightarrow A_h = \tan^{-1}(H/S)$$

Ecuación 23: Determinación del ángulo de obstrucción [230].

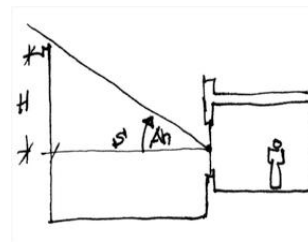


Figura 133: Regla de oro de la línea sin cielo como determinante del paisaje urbano [230].

Esta definición guarda relación con la *regla de la línea sin cielo* en ámbito urbano y el máximo ángulo de obstrucción que se permite para proporcionar unos adecuados accesos a la iluminación natural y al soleamiento en los entornos urbanos [230].

Cada planta de un edificio, por tanto, tendrá unas condiciones de acceso solar diferentes, debido a la presencia de las edificaciones del entorno. Los requisitos de iluminación de las plantas inferiores, entonces, serán más difíciles de cumplir ya que la presencia de obstrucciones será mayor y es posible que sea necesario tomar medidas que compensen la pérdida de visión del cielo, incrementando el tamaño de ventanas o disminuyendo el fondo del local. Otra medida recomendada para paliar esta pérdida es el retranqueo de las plantas superiores mediante la formación de áticos [230].

Esta relación entre la anchura y la altura de las obstrucciones también está presente en la relación de dimensiones de los patios interiores de luces y ventilación, definiendo valores mínimos para asegurar unas ciertas condiciones de iluminación.

En el caso de las ‘Normas Urbanísticas del Plan General de Ordenación Urbana de Sevilla’ [227], se definen estas proporciones en función de la altura del obstáculo y según cada zona de ordenanza:

- Normas generales de edificación: Dimensión de los patios de parcela
  - “En viviendas unifamiliares la dimensión de cualquier lado del patio será igual o superior a un tercio de la altura ( $h/3$ ), con un mínimo de 250 cm.
  - En las viviendas plurifamiliares sus parámetros serán los siguientes:
    - La dimensión de los patios de parcela se establece en función del uso de las piezas que abren a ellos y de la altura ( $h$ ) del patio.
    - Dimensiones mínimas:

Uso del local	En relación con la altura	Ángulo de obstrucción
Patios vivideros	$H$	45°
Patios de luces:		
Si iluminan piezas habitables excepto la cocina	$H/3$	71°5'
Si sólo ilumina la cocina	$H/4$	76°
Patios de ventilación	$H/5$	78°7'

Tabla 12: Especificaciones sobre la dimensión mínima de los patios de parcela [227].

- La embocadura de los patios abiertos deberá tener un ancho mayor a un tercio de la altura ( $h/3$ ) y como mínimo 6 metros.”
- Zona Centro Histórico
  - “En las viviendas plurifamiliares se permiten únicamente los patios de parcela en las condiciones fijadas en las normas generales de edificación, si bien los patios vivideros tendrán unas dimensiones mínimas de hasta los dos tercios de la altura ( $2h/3$ ), con un mínimo de 5 metros. En las viviendas unifamiliares y en las plurifamiliares de hasta dos viviendas, se permitirán únicamente patios de parcela, que deberán permitir la inscripción de un círculo de diámetro igual a un cuarto de la altura ( $h/4$ ), con un mínimo de dos metros.”

Teniendo en cuenta que en Sevilla la máxima elevación solar es de 76° aproximadamente durante el solsticio de verano, las dimensiones mínimas de los patios según vienen expresadas en las normas aseguran un soleamiento mínimo en los patios vivideros y los patios de luces que iluminan piezas habitables de las viviendas. Sin embargo los patios de luces para las cocinas y los patios de ventilación no tienen porqué tener presencia de Sol directo durante el año.

### Condiciones de Calidad e Higiene de la edificación

Estas condiciones se establecen para garantizar el buen hacer constructivo y la salubridad en la utilización de los locales por las personas. Éstas establecen los requisitos de habitabilidad de los espacios, así como su acondicionamiento térmico y sus necesidades de iluminación natural, entre otros.

Como fórmula general en el ámbito español, se establece que una pieza habitable debe ser un local exterior, es decir, dar a un espacio libre (vía pública, espacio público, espacio libre o patio conforme a las normas correspondientes) y cumplir con los requisitos de superficie de huecos (para iluminación natural) y superficie de ventilación.

Sobre la superficie de huecos y los requisitos de luz natural, nos encontramos diferentes formulaciones en el panorama nacional. En el caso de Sevilla [227] se hace énfasis en la iluminación natural frente a la iluminación artificial, estableciendo *una superficie mínima de hueco del 10% de la superficie de suelo*, similar a los requisitos suizos.

*“En el diseño de todo edificio o construcción, la iluminación diurna será preferente y básicamente natural (solar) en las dependencias destinadas a la estancia o al trabajo prolongado de personas, de manera que la iluminación artificial sólo sea considerada como solución excepcional o de emergencia para las horas diurnas.*

*Los huecos de ventilación e iluminación de las piezas habitables deberán tener una superficie no inferior a un décimo (1:10) de la planta del local. No se dispondrá de ningún puesto de trabajo estable a más de diez (10) metros de distancia de los huecos de iluminación y ventilación, salvo especiales exigencias técnicas de la actividad. [...]”*

Respecto a las condiciones de Uso Residencial se establece que *“todas las piezas habitables de una vivienda exterior tendrán huecos que abran a espacio abierto o a patios de luces, y al menos una pieza habitable recaerá sobre calle o espacio público”*. Las viviendas interiores tendrán *“todas las piezas habitables con huecos que abran a espacio abierto o a patios de luces, y al menos dos piezas habitable tendrán huecos que abran a patios vivideros”*. Sin embargo, no se prescribe la obligatoriedad de apertura de huecos al exterior de las edificaciones de Uso Industrial, Uso Terciario (comercio, oficinas, uso hotelero, uso recreativo, garaje-aparcamiento, agrupaciones terciarias y grandes superficies comerciales) ni Uso de Equipamientos y Servicios Públicos, relegando a las normas sectoriales las condiciones de habitabilidad.

En el *‘Anexo II sobre las Disposiciones Generales de las Edificaciones en materia de Calidad, Higiene, Dotaciones y Seguridad’* se contempla el soleamiento dentro de las condiciones de *Acondicionamiento térmico y acústico pasivo*, mientras que las condiciones de iluminación vienen recogidas dentro de las Condiciones de higiene de la edificación, respectivamente:

*“Todo edificio [...] contemplará en su diseño el máximo nivel de acondicionamiento térmico pasivo mediante la combinación adecuada de:*

- *Orientación solar idónea, explotando las posibilidades de la parcela*
- *Soleamiento adecuado, dotando de protección solar adecuada y suficiente a todos los huecos de fachada. Esta protección deberá poder realizarse mediante persianas móviles o mediante protecciones fijas si se garantiza su funcionalidad. No será obligatoria la previsión de persianas móviles para supuestos de baños, aseos, trasteros y escaleras comunitarias, siempre que la superficie de los huecos sea igual o inferior a un metro cuadrado (1 m<sup>2</sup>). [...]”*

### 2.3.2.3 Normativa de Eficiencia Energética

Como se ha visto, la *radiación solar visible difusa* en los espacios suele regularse para proveer unas condiciones mínimas de habitabilidad de los mismos y la *radiación solar directa* se expresa en forma de *horas de soleamiento*, sirviendo como un elemento configurador de la ciudad. Sin embargo, en los requisitos relativos a las *horas de soleamiento* y su distribución a lo largo del año no se considera la intensidad de la misma ni el efecto térmico que éstas producen sobre los espacios sobre los que incide.

Los textos legislativos relativos a la *eficiencia energética de la edificación* incorporan la radiación solar a dos requisitos diferentes. Por un lado, la *radiación solar térmica directa* representa

una carga interna de los espacios y su admisión puede controlarse mediante la definición y caracterización de los elementos semitransparentes de la envolvente térmica, es decir, de los huecos, considerando los elementos del entorno y del propio edificio que supongan un obstáculo al acceso solar.

Por otro lado, desde un punto de vista energético, la luz natural es un recurso natural, una fuente libre de emisiones de CO<sub>2</sub>, es decir, podría considerarse una fuente de energía renovable. Bajo esta consideración, cualquier aporte de energía renovable supone la reducción del consumo de energía fósil del sistema. En este sentido, los documentos sobre la *eficiencia energética* de las instalaciones de iluminación artificial, además de limitar la potencia instalada, consideran la iluminación natural en los procesos de regulación del funcionamiento de dichas instalaciones.

### **Eficiencia Energética de la Envolvente Térmica**

La *radiación solar térmica directa* forma parte de los procesos de cálculo de la *eficiencia energética de los edificios*, estando su admisión indirectamente controlada mediante la definición del *Factor Solar Modificado de los huecos (F)*, que considera el *Factor Solar -g<sub>L</sub> o Coeficiente de Ganancias Solares* reducido por la presencia de elementos que obstaculicen el acceso solar de la misma.

El *Factor Solar Modificado de los huecos* se define como “*la fracción de la radiación incidente en un hueco que no es bloqueada por el efecto de los obstáculos de fachada y las partes opacas del hueco*” [137]. Es decir, que el *Factor Solar Modificado de los huecos*, junto con su *transmitancia solar*, es el medio para expresar la *ganancia solar térmica* que se introduce en el espacio.

Mientras que el cálculo analítico de las *ganancias solares* está internacionalmente aceptado, los diferentes documentos normativos presentan variaciones tanto en su cálculo como en el ámbito para las que se calculan en base a diferentes consideraciones [243]:

De acuerdo con el estándar internacional ‘*ISO 9164:1989*’, los valores de *ganancias solares* se promedian mensualmente y dependen de la orientación de la ventana, del factor de transmisión solar del acristalamiento, del factor de sombra de las superficies transparentes y del índice de claridad. Este mismo criterio se aplica en la norma turca ‘*TS 825*’.

En Irán, el ‘*Código n° 19*’ sólo considera las *ganancias solares* para aquellas zonas climáticas con altas demandas de calefacción y se calculan como un factor de corrección o de acuerdo con la orientación de las ventanas, el factor de *transmisión visible*, el tipo de acristalamiento, las sombras arrojadas por otros edificios y la inercia térmica de los componentes del edificio. Una vez que se calcula este factor se incorpora a las pérdidas totales de calor del edificio de referencia, por lo que se reduce el aislamiento térmico del mismo.

En el ámbito europeo nos encontramos también con diversos textos que tratan directa o indirectamente la cantidad de *radiación solar* que entra en un espacio. El estándar europeo ‘*EN 832:2000*’ calcula las *ganancias solares* para un determinado periodo de tiempo y, además de las determinaciones del estándar internacional, considera el efecto de las cortinas, los dispositivos de sombreado, la carpintería de las ventanas y las sombras arrojadas por las obstrucciones exteriores al edificio. Sin embargo, en la normativa alemana, las *ganancias solares anuales* se consideran en función de la orientación de la ventana, su superficie y un valor constante de factor de sombra de 0’46 para todos los edificios.

La relativamente reciente ‘*Directiva Europea 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios*’ [244] establece unos requisitos que definen el marco común de la metodología de cálculo de la *eficiencia energética de los edificios*. También establece indicaciones sobre la

aplicación de unos requisitos mínimos de *eficiencia energética* de los factores intervinientes. Sin embargo, dicha metodología puede ser diferente a escala nacional o regional y los requisitos mínimos de eficiencia energética son establecidos por cada Estado miembro, que podrán revisarlos periódicamente.

El medio que se establece tanto en esta directiva como en la anterior, *'Directiva 2002/91/CE relativa a la eficiencia energética de los edificios'* [245], para obtener información sobre la *eficiencia energética de los edificios* es su certificación energética. La trasposición de esta directiva a la normativa española ha dado lugar a la actualización de los requisitos mínimos de *eficiencia energética* contemplados en el *'Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación'* [137] [241], donde se tratan las características térmicas de la envolvente térmica, el rendimiento de las instalaciones térmicas y de iluminación y el aprovechamiento de las energías renovables en edificación, así como el consumo máximo de los edificios. También ha supuesto la actualización de los procedimientos de certificación energética, aumentando el ámbito de aplicación a todo el parque edificatorio [246].

Las consideraciones sobre las características térmicas de los huecos, es decir, su Transmitancia Térmica (U) y su *Factor Solar Modificado (F)*, vienen recogidas en el *'Documento Básico HE-1 sobre Limitación de la Demanda Energética'* [137] [241] que debe considerar *"las ganancias y pérdidas producidas por la radiación solar al atravesar los elementos transparentes o semitransparentes y las relacionadas con el calentamiento de elementos opacos de la envolvente térmica, considerando las propiedades de los elementos, su orientación e inclinación y las sombras propias del edificio u otros obstáculos que puedan bloquear dicha radiación"*.

Sin embargo, mientras este documento especifica unos valores máximos de Transmitancia Térmica de los huecos, para determinados casos, no se especifican unos valores límite del *Factor Solar Modificado*, sino que se proporcionan los valores de referencia en función del porcentaje de superficie de huecos en la fachada, la orientación de la misma y la carga interna de los espacios.

La carga interna de los espacios es resultado de las solicitudes generadas en dichos espacios, debidas, fundamentalmente, al aporte de energía de los diferentes agentes implicados en los procesos de transferencia de calor en los edificios. La clasificación de la carga interna viene dado por la densidad de la misma, es decir, la repercusión de este aporte de energía sobre la superficie.

Lo interesante de este concepto y de los rangos que permiten categorizarlos es que, pese a que no se habla expresamente de la cantidad de *radiación solar directa* que se permite entrar en los espacios, se cuantifica a partir de qué valor se considera que un espacio es de baja, media, alta o muy alta carga interna. Estos valores pueden tomarse, en el ámbito de esta investigación como valores orientativos sobre la entrada de radiación solar térmica en los espacios desocupados.

Carga Interna	Densidad de las fuentes internas (W/m <sup>2</sup> )
Baja	<6
Media	6 - 9
Alta	9 - 12
Muy alta	>12

Tabla 13: Carga interna en función de la densidad de las fuentes internas [137].

Siendo la densidad de las fuentes internas el promedio horario de la carga térmica total debida a las fuentes internas, repercutida sobre la superficie útil. Es decir, si se quiere aplicar este criterio a la *radiación solar térmica* directa es necesario calcular el promedio horario de la evolución de la carga térmica en el espacio a lo largo de un periodo de tiempo.

De los valores de referencia de *Factor Solar Modificado* se desprende que los espacios de baja carga interna son susceptibles de admitir mayor cantidad de *radiación solar térmica* directa, que los de alta carga interna. Del mismo modo, los valores de referencia de las fachadas con orientación Este u Oeste son más estrictos que los de orientación Sureste o Suroeste, seguidas de las fachadas con orientación Sur, mientras que no se proporcionan valores de referencia para las fachadas de orientación Norte. También se permite una mayor admisión de *radiación solar directa* en los climas con veranos más suaves, restringiéndose a medida que aumenta la severidad climática estival.

### **Eficiencia Energética de la Instalación de Iluminación Artificial**

La metodología de cálculo de la *eficiencia energética* de la '*Directiva Europea 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios*' [244] incluye la consideración de diversos factores de la edificación como las características térmicas de su envolvente, el rendimiento de sus instalaciones térmicas y de iluminación o la utilización de energía procedente de fuentes renovables. Entre estos aspectos menciona una «adecuada iluminación natural».

En el ámbito de la certificación y la reducción de consumo energético, además de la *radiación solar directa* como aspecto térmico de la luz, interviene la iluminación natural como un medio de control de la instalación de iluminación artificial, luego como estrategia de mejora de la *eficiencia energética*.

La trasposición de las consideraciones sobre el cálculo de la iluminación de la directiva anterior, la '*Directiva 2002/91/CE*', a la normativa francesa se tradujo en la zonificación térmica del edificio en función de la *disponibilidad de iluminación natural*, además del establecimiento de diferentes escenarios de cálculo de la iluminación para edificios residenciales y los edificios de oficina [239].

Este reglamento, de ámbito térmico, proporciona un método de cálculo de iluminación natural, cuyo objetivo es la determinación de cuándo se requiere el uso de la iluminación eléctrica de forma horaria para cada habitación. Este método de cálculo se basa en la zonificación del edificio, en base a la *regla de la línea sin cielo* y a las *transmitancias visibles* de los huecos. Con estos datos se calcula la *iluminancia natural media*, basada en el concepto del *Factor de Iluminación Natural (DF)*, y, con ella, el *Factor de Dependencia de Luz Natural (FD)*, según la norma '*UNE -EN 15193*' [232], siendo el consumo energético horario energético la inversa de este factor.

Es decir, la iluminación natural sólo es un instrumento para determinar el consumo energético de la iluminación artificial, pero no se incluyen requerimientos mínimos de *iluminancia natural* en los espacios. Lo que sí se establecen son los *valores de iluminancia interior* y el *Factor de Dependencia de Luz Natural*. En edificios residenciales estos valores son de *200 lux y 0'05 FD*. En edificios no residenciales se compara el consumo con un edificio de referencia.

En la normativa española, el '*Documento Básico HE 3 sobre Eficiencia Energética de las Instalaciones de Iluminación*' [137] [241] establece la obligatoriedad de disposición de sistemas de regulación y control de la instalación para el *aprovechamiento de la luz natural* pero sólo es de aplicación para casos muy concretos y no se especifican unos requisitos mínimos de iluminación natural de los espacios. Además, esta norma excluye el interior de las viviendas de su ámbito de aplicación, las cuales representan un gran porcentaje del parque edificatorio nacional.

Para considerar la luz natural en la regulación de las instalaciones de iluminación artificial, la norma establece dos casos distintos: edificio con una obstrucción frontal y edificio con patio interior con o sin cubrir. En el primer caso, la consideración de la luz natural depende del ángulo de obstrucción, de la transparencia del vidrio (*transmitancia visible*) y de la relación entre la superficie acristalada y la superficie de fachada. *El ángulo de obstrucción que marca la norma es de 65°*,



pero respecto al plano de fachada [Figura 134], por lo que, en realidad, el primer caso recupera la *regla de oro de la línea de 25°* y la *superficie mínima de acristalamiento*.

En el caso de los edificios con patios no cubiertos, el *aprovechamiento de la luz natural* es obligatorio a partir de una cierta relación entre la altura del local y la distancia a la fachada opuesta del patio. Como *se marca una relación ancho/alto mayor de 2*, este requisito recoge las determinaciones sobre la *anchura mínima de las calles* de la *regla de la línea sin cielo* en ámbito urbano [230] aplicadas a un patio interior.

En el caso de los patios cubiertos, esta relación geométrica se ve afectada por la transparencia del material que cubre el atrio. Este requisito además se combina con la relación de superficie mínima acristalada, modificada por la transparencia de los elementos involucrados.

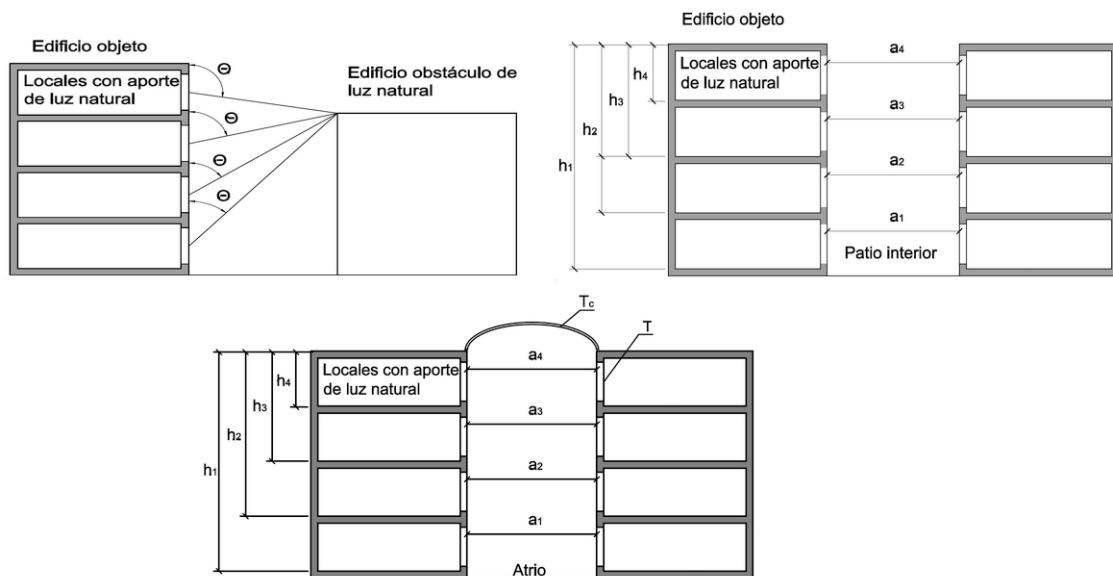


Figura 134: Casos en los que se debe considerar el aporte de luz natural para la regulación de la iluminación artificial en el ‘Documento Básico HE3’ [241].

En Tailandia [247] la norma energética se basa en valores de *transferencia térmica globales* para toda la envolvente (*Overall Thermal Transfer Value -OTTV*), por lo que no se obtiene explícitamente el valor de *ganancia solar a través de las ventanas* porque considera la envolvente como una unidad. Sin embargo, la luz natural se tiene en cuenta de forma separada como una aplicación de energías renovables en el edificio.

Para ello, considerando la *disponibilidad de luz natural exterior*, se presupone que se obtiene un nivel de iluminación suficiente por medios naturales en el plano de trabajo a una distancia de 1’5 veces la altura del espacio, retomando, por tanto, la *regla de la línea sin cielo*. En base a esta regla, se especifica cómo se debe diseñar el sistema de iluminación artificial. Si se cumplen determinadas condiciones, se asegura una “*adecuada iluminación natural sin excesivas ganancias solares*”. Sin embargo, no se especifican requisitos mínimos de iluminación natural.

En Egipto [248], el ‘*Código Energético de Edificación*’ para edificios residenciales, aprobado en 2006, considera la incorporación de iluminación natural como parte de los requerimientos sobre energías renovables, de forma que, sin ser una norma específica sobre luz natural, establece una *superficie mínima de ventana, entre el 10 y el 15%*, y rangos de iluminancias a obtener en cada tipo de espacio dentro de la vivienda.

### 2.3.2.4 Certificación Medioambiental

---

Se sabe que la consideración del concepto del *Factor de Iluminación Natural (DF)*, calculado con el modelo de *Cielo Nublado Estándar CIE*, da lugar a la obtención de unas condiciones de iluminación natural independiente de la localización y la orientación del espacio de estudio.

Para suplir esta desvinculación algunas normas, especialmente aquellas enfocadas a la sostenibilidad de los edificios, incluyen la opción de cálculo del *Factor de Iluminación Natural* utilizando modelo de *Cielo Despejado Estándar CIE*.

En este sentido, el estándar '*ASHRAE Standard 189.1*' sobre el diseño de edificios sostenibles de alto rendimiento [249] establece que "*Hay que demostrar a través de las simulaciones de los espacios de oficinas y aulas que hay una iluminancia utilizable calculada mediante un modelo computacional de trazado de rayos o de radiosidad o el modelo de Cielo Nublado Estándar CIE o el modelo de Cielo Despejado Estándar CIE. Y que el soleamiento directo no incide en la superficie de trabajo más del 20% del tiempo*".

La versión 2.2 del certificado *LEED (Leadership in Energy & Environmental Design)* [18] para nuevos edificios otorga una serie de puntos en función de la evaluación de la iluminación natural, donde introduce una opción de cálculo del *DF* con cielo despejado.

Para obtener los puntos del requisito de iluminación natural hay que "*demostrar, mediante simulación por ordenador, que se obtiene un Factor de Iluminación Natural mayor del 2%, o más de 25 foot candles (269 lux), en, al menos, el 75% de las superficies habitualmente ocupadas. El modelo informático debe demostrar que se consigue este valor bajo condiciones de cielo despejado, al mediodía, durante el equinoccio, a 30 pulgadas del suelo*". Pero, un cielo despejado sin presencia de iluminación directa del Sol es físicamente imposible, pese a su normalización [50] [220] [117]. De manera similar a las versiones anteriores de *LEED* la guía de la certificación *BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)* [19] establece que "*al menos el 80% de la superficie de suelo de los espacios ocupados debe tener un Factor de Iluminación Natural Medio del 2% o mayor*".

Estas recomendaciones pueden determinar aspectos claves del diseño de los edificios, obligando a una determinada cantidad de acristalamiento, sin consideración de las incidencias térmicas o sobre el confort visual que conlleva. La versión 3.0, en una aproximación a la definición de los rangos de *Iluminancia Natural Útil (UDI)* propone como condición para la obtención de los créditos de acreditación de iluminación natural que "*se debe obtener un nivel de iluminación entre 25 y 500 foot-candles (269 y 5381.9 lux) entre las 9'00h y las 15'00h durante el equinoccio en condiciones de cielo despejado*".

Sin embargo, tras la reciente publicación del estándar '*IES LM-83-12*' [126] donde se reconocen dos *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)*, se ha incorporado esta nueva metodología de cálculo a la versión 4.0 del sistema de acreditación *LEED*. Para obtener los créditos de iluminación natural hay que "*demostrar mediante simulación anual que la Autonomía Espacial de 300 lux durante el 50% del tiempo de ocupación ( $sDA_{300, 50\%}$ ) es de al menos, el 50%, el 75% o el 90% de la superficie ocupada, según el caso, y, además, demostrar que la Exposición Solar Anual a 1000 lux durante 250 horas ( $ASE_{1000, 250}$ ) no se supera en más del 10% de la superficie ocupada*".

### 2.3.3 Suficiente Luz Natural

Hasta hace casi quince años, el análisis cuantitativo de la iluminación natural sólo podía realizarse mediante el cálculo del *Factor de Iluminación Natural (DF)* o la determinación de valores absolutos de iluminancia bajo condiciones de cielo específicas, dependientes de la localidad y el momento de cálculo cuando se utilizan modelos de cielo distintos del *Cielo Nublado Estándar CIE*.

Parte del éxito y aceptación del *Factor de Iluminación Natural*, incluso en países soleados, reside en el sentimiento general de que el cálculo del *DF*, utilizando el *Cielo Nublado Estándar CIE*, representa «las peores condiciones» de iluminación natural, por lo que, cumpliendo con los mínimos recomendados se tiene la impresión de que las condiciones de iluminación natural sólo pueden ir a mejor [220].

Tal como se ha discutido anteriormente, el *Factor de Iluminación Natural* se adecua mejor a las condiciones más habituales de iluminación natural del norte de Europa, pero en ocasiones se ha visto aplicado en localidades cuyo clima se caracteriza por cielos despejados y sin apenas presencia de cielos nublados. Además, pese a que se sabe de la conexión entre el valor de *Factor de Iluminación Natural* y el nivel absoluto de iluminación, apenas se utiliza la conversión, por lo que se desconoce cuál es el valor de iluminancia media que se obtiene en una habitación que cumple con los requisitos de *DF* establecidos en las normas, guías o recomendaciones [220].

Como se puede observar, el *Factor de Iluminación Natural* juega un papel importante en las vigentes normas y guías, sin embargo actualmente se están realizando numerosos esfuerzos en el campo de la investigación para desarrollar nuevos indicadores de iluminación natural que complementen/reemplacen el *Factor de Iluminación Natural*. En este ámbito, los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)* están teniendo un gran impulso.

Entre los argumentos a favor se encuentran su enfoque holístico considerando las condiciones climáticas locales y la orientación de las fachadas de los edificios y su capacidad para su integración con los modelos de análisis energético. Para su implantación se requiere una metodología normalizada, que establezca criterios y convenciones, acordada por la comunidad internacional, determinación que va adquiriendo más urgencia a medida que transcurre el tiempo [236].

En este sentido, recientemente la *IESNA* ha aprobado un método para el cálculo de la *Autonomía Espacial de Luz Natural (sDA)* y la *Exposición Solar Anual (ASE)* [126]. Sin embargo el cálculo de los *DDMs* no está muy extendido, y las herramientas disponibles para su cálculo son utilizadas fundamentalmente por expertos e investigadores, necesitando de un mayor desarrollo para llegar a todo el público [50].

Mientras que se normaliza el análisis dinámico, mediante la exclusión del *Factor de Iluminación Natural* como indicador de iluminación natural, *J. Mardaljevic* [220] y *J. Christoffersen* [50] proponen el uso de las *curvas acumulativas de iluminancia difusa horizontal exterior* extraídas de los archivos climáticos estandarizados que permiten conocer la frecuencia con que se obtiene un determinado valor de *iluminancia difusa horizontal exterior*, por lo que se puede obtener el *Factor de Iluminación Natural* en base a las condiciones climáticas locales a conseguir en el espacio para alcanzar un determinado *nivel de iluminación*, por ejemplo 300 lux, durante un determinado porcentaje de tiempo a lo largo del año, por ejemplo 50% desde el amanecer al atardecer [224].

Utilizando estas curvas para la obtención del *Factor de Iluminación Natural* en función de las condiciones climáticas específicas de la localidad se podrían actualizar las normas que se basan en el *DF*, adoptando criterios similares al propuesto por la *IESNA*, es decir, un nivel de iluminación

mínimo, durante un determinado rango temporal, alcanzado por una determinada proporción del plano de trabajo [220].

Actualmente, el *Comité técnico 169 del Comité Europeo de Normalización (CEN TC 169/WG 11)* está trabajando en un proyecto normativo de iluminación natural donde se propone el *Factor de Iluminación en base a clima ( $DF_{cb}$ )* como medio de garantizar unas ciertos valores absolutos de iluminancia, objetivo y mínimo, durante un determinado rango temporal en una determinada porción del plano de trabajo [224]. Apoyado en estudios científicos se recomienda *un nivel de iluminación objetivo de 300 lux en el 50% del plano de trabajo para espacios iluminados unilateralmente para el 50% de las horas diurnas anuales*. Este objetivo luminotécnico, similar a la definición de la *Autonomía espacial de Iluminación Natural (sDA)*, puede obtenerse bien mediante el valor mediano de la iluminancia horizontal exterior difusa de las horas diurnas anuales o bien mediante el valor mediano de la iluminancia horizontal exterior global a través de la *Modelización en base climática de la Luz Natural*.

A medida que se endurecen las normativas y códigos de edificación en aras de una menor emisión de gases de efecto invernadero, la luz natural, en su aspecto visible, cobrará una mayor importancia, todo ello facilitado en gran parte al desarrollo y expansión de un método de cálculo que comparte las mismas bases temporales y climáticas que los modelos energéticos, permitiendo su integración e interacción.

Si el objetivo último de la edificación es proporcionar unas condiciones de confort a sus ocupantes, las futuras revisiones de los códigos de edificación deberían considerar la radiación solar en su rango térmico y visible ya que su incidencia en los espacios afecta a las condiciones higrométricas y a las condiciones de iluminación de los mismos.

Por tanto los códigos deberían exigir unas condiciones mínimas de iluminación, unos requisitos de iluminación natural específicos, así como una regulación más concreta sobre las condiciones de confort lumínico. La inclusión de la *Simulación Dinámica de Iluminación Natural (Dynamic Daylight Simulation -DDS)* como método de cálculo permitiría además, evaluar con mayor precisión la iluminancia obtenida a lo largo del año, así como detectar probables situaciones de deslumbramiento, efectos no-visuales de la luz natural o integrarse con las simulaciones energéticas para obtener las implicaciones térmicas de la presencia de *radiación solar directa* en los espacios [236].

## 2.4 Estrategias arquitectónicas

Durante siglos, la luz natural era la única fuente de iluminación disponible y eficiente. Estaba por tanto en manos de la Arquitectura, el diseño arquitectónico de los edificios, crear espacios con tales características que permitieran admitir y distribuir la suficiente cantidad de luz natural en su interior a la par de proteger a sus ocupantes de las inclemencias climáticas [71].

La luz natural que entra en un edificio es fundamental para el desarrollo de la vida cotidiana ya que influye en las condiciones de *confort visual*, en el estado de ánimo de los usuarios, en su salubridad, en las *ganancias solares* a través de las ventanas y en los aspectos cualitativos del espacio iluminado [250] [251]; además, contribuye a la reducción del consumo energético de iluminación artificial. La iluminación natural de los espacios depende, principalmente, del diseño del edificio y las condiciones de su entorno.

Las decisiones de proyecto influyen en las condiciones de iluminación natural y en las estrategias encaminadas a controlar la luz natural, configurando y determinando la forma arquitectónica. Ambos aspectos son inseparables y, además, influyen en las cargas térmicas de los espacios interiores [71], así como en el consumo energético de iluminación, calefacción y refrigeración [9]. La luz natural, como variable de diseño, puede influir profundamente en aspectos tan relevantes como la orientación del edificio, su forma, sus espacios interiores y cómo se perciben [252].

Para una situación determinada del Sol y de cielo la cantidad y cualidad de la iluminación natural de un espacio dependerán del tamaño, la orientación y las características de los huecos; de la forma y el aspecto del edificio; de los elementos de su entorno; entre otros [1].

building	room	window	daylighting systems
daylight availability	relation to adjacent spaces	design of facades and windows	function of system(s)
latitude	autonomous	single design	multiple functions
sun shine probability	borrowing light	multiple design	glare, shading, redirection
temperature	giving light	division within windows	glare, solar shading
...	interchanging light	division between windows	glare, redirection
obstruction	fenestration	division between windows	shading, redirection
building design scheme	unilateral, sidelight		single function
beam shaped	unilateral, top-light		protection from glare
courtyard/atria	multilateral, sidelight		solar shading
block	multilateral, sidelight and top-light		redirection
nucleus			other function
...	proportion		
	height to depth, ratio		

Figura 135: Diseño de Iluminación Natural de los edificios. Estrategias [71].

Las decisiones que se toman en las primeras fases de proyecto tienen un gran impacto en el comportamiento del edificio ya terminado. Por ejemplo, la elección de la forma del edificio, la profundidad y la altura de los espacios, y el tamaño de las ventanas pueden, en conjunto, duplicar la demanda energética del edificio. También pueden reducir a la mitad el *potencial de iluminación natural* de un espacio y aumentar la temperatura interior en verano de tal forma que afecte negativamente a la productividad de los trabajadores [253]. *Bodart y De Herde* [10] demostraron que la orientación de los huecos, la superficie y posición de los mismos, su transparencia, entre otros, tienen un gran impacto en el consumo de iluminación artificial.

Los *indicadores de iluminación natural*, desde su concepción, toman en consideración los diferentes elementos que afectan a la cantidad de luz natural que finalmente se obtiene en el interior del espacio. Estos elementos suponen, generalmente, una reducción de la *disponibilidad de luz natural (daylight availability)* o del *potencial de iluminación natural*, respecto a las condiciones a

cielo abierto. De hecho, la evolución del *Factor de Cielo (SF)* hacia el *Factor de Iluminación Natural (DF)* se debe a la incorporación de parte de estos elementos como la luz reflejada en los elementos del entorno, las características ópticas de los acristalamientos o las reflectancias de las superficies interiores [13].

La magnitud y distribución del *Factor de Iluminación Natural* en un espacio viene determinado por ciertas decisiones arquitectónicas. Éstas son la orientación hacia elementos externos que obstruyen la visión del cielo; el tamaño, distribución, localización y las características de las ventanas o huecos; el tamaño y la configuración del espacio; y la *reflectancia* de las superficies interiores y exteriores [1]. A estas estrategias arquitectónicas habría que añadir el valor de la *iluminancia horizontal exterior*, que también influye cuantitativamente en el valor del *DF*.

Las decisiones arquitectónicas que afectan a las condiciones de iluminación natural y exposición solar, en general, van ligados a la forma arquitectónica, por lo que un adecuado conocimiento de la influencia de estas decisiones [16], o el estudio realizado mediante simulaciones informáticas durante el proceso de diseño [142] [150], va a permitir una toma de decisiones más consciente sobre aspectos que son difícilmente modificables a posteriori [151] [152] [153], como es el caso de los edificios existentes, donde los principales elementos que intervienen en la determinación de las condiciones de iluminación natural, y su carga térmica asociada, ya están definidos, reduciendo, por tanto, el margen de intervención.

La mayoría de estos elementos, además, se definen en las primeras fases del proyecto arquitectónico [16]. Algunos de ellos vienen impuestos por la localización, como las condiciones climáticas; otros permiten cierta libertad de movimiento, como la presencia de los elementos del entorno y la orientación, para aprovechar la *potencialidad del emplazamiento*; y otros, como las características de los huecos, vienen definidos en el *proyecto arquitectónico* del edificio.

En el estudio de Iluminación Natural, el Sol y el Cielo representan las fuentes primarias de luz. Mientras que el *Factor de Iluminación Natural* no considera la presencia de luz proveniente directamente del Sol, la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)* no sólo la tiene en cuenta, sino que se basa en las condiciones climáticas locales, por lo que esta variabilidad climática específica de la localidad viene a sustituir a los parámetros que se incluyen en la *Componente de Cielo (SC)* del *Factor de Iluminación Natural*.

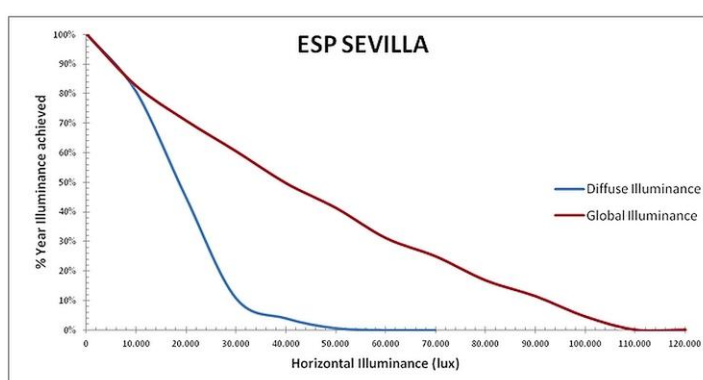


Figura 136: Curva de frecuencia acumulada de iluminancia horizontal exterior global y difusa para Sevilla. P.M. Esquivias.

La identificación de las condiciones climáticas predominantes y estacionales, como las *horas probables de soleamiento*, la temperatura ambiental, la radiación solar, etc., son fundamentales para proponer estrategias que permitan la mayor adaptación del edificio al medio en el que se inserta [254]. En localizaciones de latitudes altas, los *niveles de iluminación* durante el invierno son bajos, por lo que todos los esfuerzos se centran en aumentar todo lo posible la admisión de luz

natural en los espacios. Por el contrario, en los trópicos, con altos niveles de iluminación durante todo el año, el énfasis se pone en la prevención del *sobrecalentamiento* de los espacios restringiendo la cantidad de luz admitida en los mismos, y con ella, la *ganancia solar térmica* a través de sus huecos [71].

La *disponibilidad de luz natural* no sólo depende de la localización sino también de la orientación del edificio; cada orientación requiere unas determinadas estrategias de diseño. Además, el emplazamiento del edificio vendrá determinado por los elementos que configuran su entorno y que representan obstáculos del acceso de la radiación solar al edificio [71]. Estas obstrucciones exteriores como la presencia de árboles u otros edificios pueden alterar permanentemente la cantidad de luz que puede entrar por una ventana. El patrón de obstrucciones normalmente varía con la posición de cada ventana del edificio [252], por lo que el estudio de los *elementos del entorno*, por tanto, permite conocer el *potencial de exposición a la radiación solar*, térmica y lumínica, de cada una de las fachadas del edificio [71], y establecer estrategias de diseño a partir de sus resultados.

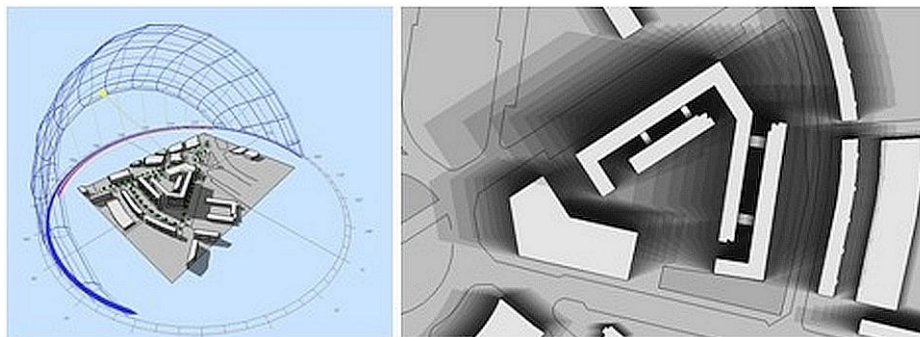


Figura 137: Influencia del entorno urbano y la forma construida en el *acceso solar* de la envolvente del edificio. P.M. Esquivias.

La forma del edificio y su altura, en relación a las condiciones del emplazamiento, determinará las superficies expuestas a la radiación solar donde se abrirán los huecos, es decir la envolvente del edificio, y con ello la relación entre superficie acristalada y superficie de suelo del espacio que ilumina. Los huecos son los elementos que definen cuantitativa y cualitativamente la admisión y *distribución de luz natural* y de *ganancia solar térmica* en los espacios, actuando de este modo de filtro de las condiciones exteriores, variando según su posición respecto al plano que se quiere iluminar, sus dimensiones, su distribución en los paramentos que los contienen y sus características físicas.

Los huecos están sujetos, por un lado, a los avances tecnológicos y, por otro, a modificaciones de sus características debido a la presencia de elementos de protección solar, ya estén ubicados por el interior, el exterior o en las capas intermedias de los acristalamientos. Estos elementos, además de bloquear la entrada de *radiación solar directa* también pueden utilizarse como elementos reflectores incrementando la entrada de *radiación difusa* en los espacios [252].

Si no se proporcionan desde el proyecto arquitectónico unas adecuadas condiciones de iluminación natural y de protección solar, el control de las condiciones interiores entonces suele relegarse a la acción de los ocupantes mediante el empleo de persianas, cortinas o cualquier dispositivo similar, o bien a la acción de los sistemas de regulación.

Son los ocupantes los que abren o cierran estos elementos en base a su percepción de las condiciones ambientales interiores, generalmente para acabar con situaciones de desconfort térmico y visual. Sin embargo, suele ser bastante habitual que una vez reducida la entrada de luz al espacio, estos dispositivos sigan cerrados aunque las condiciones exteriores hayan cambiado [1].

En el caso de los sistemas de regulación de los diferentes elementos de control (protección solar móvil, iluminación artificial y sistemas térmicos) el problema reside en la adecuada adaptación de su funcionamiento a los requerimientos de los usuarios, la ubicación de los sensores o la capacidad de respuesta de los sistemas, entre otros factores, siendo bastante habitual la manipulación de los sistemas de regulación por parte de los usuarios o incluso la desactivación de los mismos.

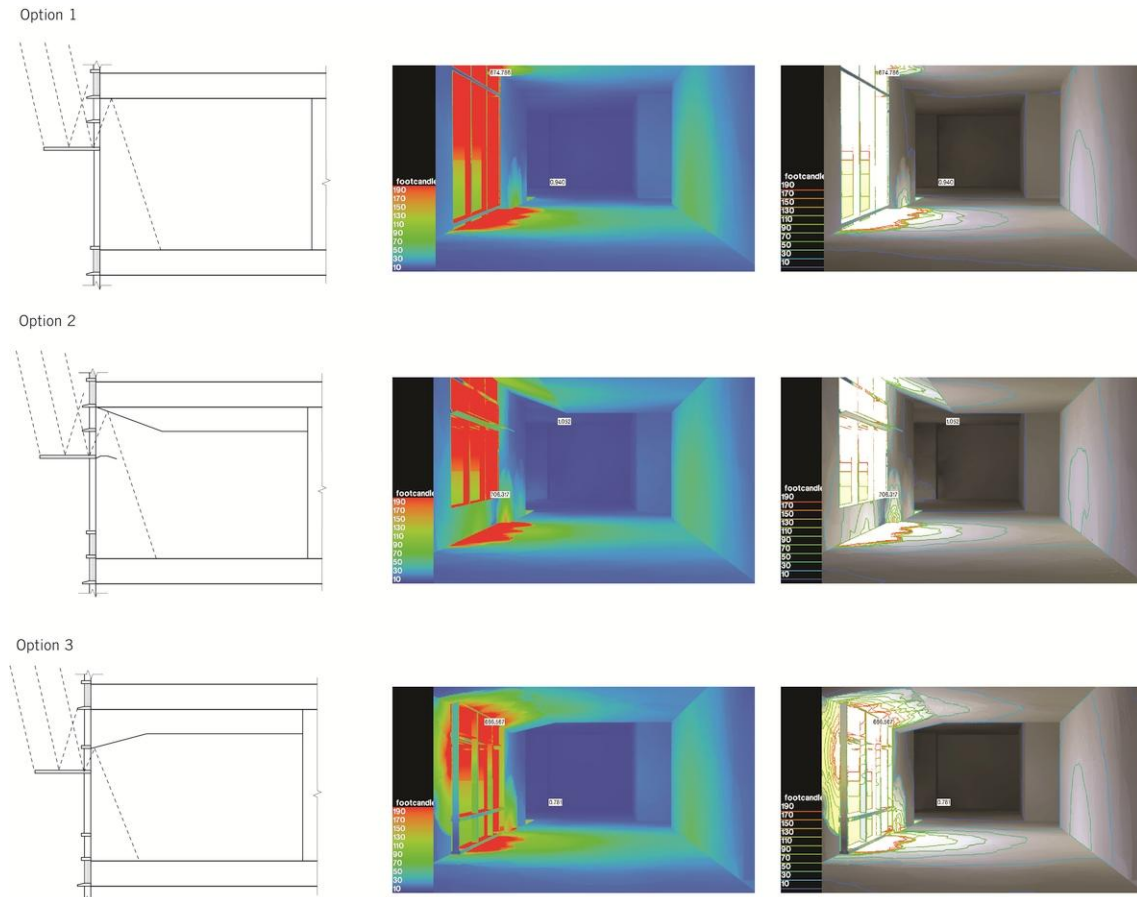


Figura 138: Efecto de las protecciones solares en el ambiente interior [255].

Por tanto, bajo un diseño inadecuado de los edificios, serán los usuarios los que traten de controlar las condiciones ambientales interiores, cuyas acciones, generalmente, dan como resultado una muy baja explotación del *potencial de iluminación natural* porque las persianas suelen estar cerradas la mayor parte del tiempo manteniendo la iluminación artificial encendida [10]. En cualquier caso, son elementos que vienen a compensar las deficiencias ambientales que no es capaz de proporcionar el edificio por sí mismo mediante su acondicionamiento lumínico y térmico.



### 2.4.1 Condiciones climáticas

La globalización del mundo actual hace posible que un mismo estudio de arquitectura diseñe edificios para cualquier parte del mundo aplicando estrategias de iluminación natural y de acondicionamiento térmico propias de sus condiciones climáticas de origen o estandarizadas a través de recomendaciones internacionales o diversas «reglas de oro».

Por lo tanto es fundamental, a la hora de incorporar diferentes estrategias de acondicionamiento lumínico y térmico, conocer cuál es su efectividad en función de las condiciones climáticas locales: no todas las soluciones son válidas para todos los lugares del mundo. El conocimiento de las diferencias relativas entre los diferentes climas permitirá, por tanto, una mayor adaptación de los edificios a sus condiciones climáticas locales.

El estudio de la iluminación natural supone la valoración de la iluminación generada por las fuentes naturales (Sol y cielo) en un punto determinado. Esta iluminación que generan las fuentes se expresa habitualmente mediante la distribución discrecional de luminancias de la bóveda celeste [21]. Esta luminancia, en la realidad, tiene una alta variabilidad en función de una serie de parámetros meteorológicos, estacionales y geométricos de difícil sistematización [87]. En base a estos parámetros los niveles de iluminación provenientes de las fuentes de luz natural tienen una alta variabilidad temporal y cuantitativa.

Desde principios del siglo XX, se han desarrollado diversos modelos de cielo que permitieron aproximarse, aunque con cierto grado de imprecisión, a las condiciones reales de la *distribución de luminancias* de la bóveda celeste [21]. De los modelos de cielo adoptados por la CIE destacan el modelo de *Cielo Nublado Estándar CIE* desarrollado por *Moon & Spencer* y el modelo de *Cielo General Estándar CIE*, desarrollado por *Perez* y aceptado como estándar en 2003 [87].

Cada modelo de cielo está íntimamente relacionado con el método de cálculo y concepción de los indicadores de iluminación natural, y éstos con la obtención de un determinado *nivel de iluminación* interior, siendo éste el objetivo último de las normativas y recomendaciones.

En el caso de estudiar el *Factor de Iluminación Natural (DF)*, donde sólo se considera la iluminancia difusa, el modelo de cielo que más se adecua a unas posibles condiciones reales es el modelo de *Cielo Nublado Estándar CIE* o el modelo de cielo nublado contemplado en el *Cielo General Estándar CIE*, pero considerado como una situación instantánea y «congelada» en el tiempo; mientras que si se quiere obtener alguno de los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)*, como la *Autonomía de Luz Natural (DA)* o la *Iluminancia Natural Útil (UDI)*, donde se considera la iluminancia directa y difusa y su variabilidad temporal, entonces es el modelo de *Cielo General Estándar CIE* el que mejor se adapta a las condiciones específicas de cálculo.

Cuando se calcula el *Factor de Iluminación Natural* se obtiene la relación proporcional entre la cantidad de *iluminancia difusa horizontal* que se recibe en un punto respecto a la que se obtendría en un punto situado en el exterior expuesto a la totalidad de la bóveda celeste. Por lo tanto, no da un nivel de iluminancia como tal, sino un valor relativo de iluminancia difusa. Conocido el valor de *DF* en un punto y de la *iluminancia difusa horizontal exterior* es posible conocer el valor de *iluminancia difusa horizontal interior* en dicho punto. Del mismo modo, sabiendo la *iluminancia difusa horizontal exterior* y el *nivel de iluminación difusa* a conseguir, se puede determinar el valor mínimo de *DF* a conseguir.

La obtención de un determinado valor de *DF* lleva implícito la obtención de una determinada iluminancia difusa interior, para lo cual es necesario conocer el valor de *iluminancia difusa horizontal exterior*. En las primeras normativas, la definición del valor exigible para *DF* surge del

estudio de la frecuencia anual en que se obtiene una determinada *iluminancia difusa horizontal exterior*. Es decir, el valor exigido de *DF* era consecuencia de las condiciones climáticas locales, regionales o medias nacionales, siendo la determinación del *nivel de iluminación exterior* un factor clave para cuantificar la exigencia de *DF*.

Mientras que para cumplir con las exigencias de iluminación natural, la obtención de determinados valores estadísticos de *DF* en el plano de trabajo es suficiente, no es hasta que se establece su relación con el consumo de iluminación artificial [256] que surge la necesidad de conocer cuál es el nivel de iluminación natural que se obtiene en el interior y por cuánto tiempo, y este dato sólo es posible determinarlo si se conoce la cantidad de luz natural disponible exterior y la frecuencia de los niveles de iluminación exterior que se dan lugar durante un determinado periodo de tiempo [21].

La cantidad total de luz disponible proveniente del Sol y la bóveda celeste varía en función de las condiciones climáticas, considerando la turbiedad (contenido de vapor de agua y partículas en la atmósfera) y la nubosidad [21] [254], reflejándose en la relación entre la *iluminancia global* y la *iluminancia difusa* anual. Además, la posición relativa entre el Sol y la Tierra influye en la *disponibilidad de luz natural (daylight availability)*, que varía con la latitud, ya que el número de horas diurnas y la cantidad de luz disponible decrecen a medida que nos alejamos del ecuador, entre otros factores [257] [258], de forma que las localidades próximas al ecuador generalmente tienen cielos más brillantes que aquellas próximas a los polos, debido a la órbita terrestre alrededor del Sol [21].

El conocimiento de las diferentes condiciones de cielo que se dan en diversas localidades y de que estas diferencias suelen concentrarse en tan sólo unas pocas variables solares y climatológicas, impulsó los estudios sobre la *disponibilidad de luz natural* [21]. Los estudios de *disponibilidad de luz natural* se remontan hasta los años 20 y se han desarrollado en diversos países del mundo [4] [21] [102] [259] [260] [261]. Si bien a falta de valores medidos de forma rutinaria de *iluminancia horizontal global* y *difusa* fue necesario recurrir a los modelos de *eficacia luminosa*, asociados a distribuciones concretas de *luminancia* [262] [263], para obtener una estimación de dichos valores a partir de otros datos medidos [102] [113] [264] [265].

Cuando se comenzó con los estudios de *disponibilidad de luz natural* generalmente las estaciones meteorológicas obtenían datos de *irradiancia global* sobre un plano horizontal a determinados intervalos de tiempo [21] [254].

Pese los esfuerzos de la *CIE* para obtener mediciones regulares de *iluminancia* y *luminancia* para disponer de datos precisos de *disponibilidad de luz natural* para la caracterización de los cielos, como el *Programa Internacional de Medición de Luz Natural (International Daylight Measurement Programme -IDMP)* [111] [266], hoy en día son muy pocas las estaciones que miden *iluminancia* frente a la gran red de estaciones meteorológicas que miden *irradiancia* y cuyos datos son tratados estadísticamente para la elaboración de los *archivos climáticos estandarizados* que se utilizan en los programas de simulación [21] [89].

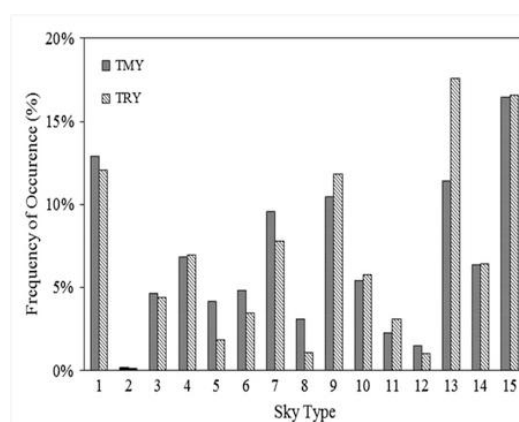


Figura 139: Frecuencia de obtención de los 15 tipos de cielo clasificados en el *Cielo General Estándar CIE* para los archivos climáticos TMY y TRY de Hong Kong [267].

Sin embargo, para obtener una información más precisa sobre la *disponibilidad de luz natural* no sólo es necesario contar con los modelos de *eficacia luminosa*, sino también la frecuencia con la que se obtienen las diferentes *distribuciones de luminancia*, es decir la frecuencia en la que se tienen los distintos tipos de cielo [4] [83] [267].

Las primeras campañas de medición de la *distribución de luminancias* de la bóveda celeste (1921-23), que llevó a la formulación matemática de la *distribución de luminancias* de un *cielo perfectamente nublado* [51], demostraron que la intensidad de luz natural que se obtiene bajo un *cielo perfectamente nublado* es la misma para cualquier latitud [57]. Tras los resultados de las mediciones en diferentes localizaciones europeas, *Waldram* concluyó que, “*en condiciones de cielo perfectamente nublado, la intensidad la luz natural es independiente de la latitud e igual a 5000 lux*”. Este valor se fijó como «valor de iluminancia exterior de referencia» en la 7ª sesión de la *CIE* celebrada en 1928 y corresponde a “*la intensidad de iluminación que se obtiene cualquier día típico nublado de diciembre a las 9’30h*” [57].

Más tarde, con datos más precisos, en las ‘*Recomendaciones internacionales para el cálculo de la iluminación natural*’ publicadas en 1970 [63], se incorporaba un ábaco para determinar la probabilidad de obtener cierto nivel de *iluminación difusa horizontal exterior* a partir de la latitud en un rango temporal entre las 9’00 h y las 17’00 h a lo largo del año [Figura 140], que corresponde con el horario de trabajo normalizado en Europa.

Estos valores, conocidos como «valores de referencia de iluminación exterior» son el resultado del análisis estadístico de los datos recogidos en las estaciones meteorológicas. En base a estos valores de referencia, la *disponibilidad de luz natural* asociada al cálculo de *DF*, puede definirse como “*la iluminancia externa del cielo disponible en un plano horizontal sin presencia de obstrucciones durante las horas diurnas de trabajo*” [21] [63].

Siendo 5000 lux el «valor de iluminancia exterior de referencia», se observa en el ábaco que, en función de latitud, se obtiene o se supera este valor con diferente frecuencia para el horario laboral establecido.

Por otro lado, *P. Tregenza* presentó otro método más directo para obtener la distribución de frecuencia de iluminancia global y difusa [102], a través de la formulación empírica en función de la *altitud solar*:

$$E = 0,0105(\gamma + 5)^{2,5} \quad (-5^\circ < \gamma \leq 5^\circ)$$

$$E = 48,8 \text{sen}(\pi\gamma/180)^{1,105} \quad (5^\circ < \gamma \leq 60^\circ)$$

Ecuación 24: Fórmula de Tregenza para la determinación de la iluminancia exterior difusa [105].

Donde  $\gamma$  es la *altitud* del Sol en grados. Estas ecuaciones se contrastaron con las *curvas acumulativas de iluminancia o curvas de distribución de frecuencia de iluminancia horizontal exterior*

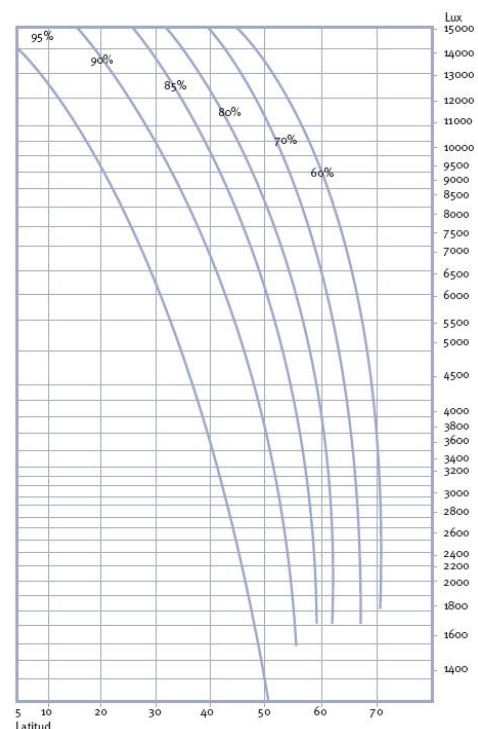


Figura 140: Ábaco para la determinación del valor de referencia de iluminación exterior [27].

*difusa* obtenidas de las mediciones realizadas en Nottingham (52.9°N), Garston (51.6°N) y Uccle (50.8°N), dando valores similares [102]. La formulación de *P. Tregenza* para la determinación de la iluminancia exterior difusa sólo se considera para latitudes alrededor de 50°N y sólo es estrictamente aplicable a climas con similares características [105].

Otra forma de obtener la probabilidad en que se alcanza una *iluminancia difusa horizontal exterior* de 5000 lux en una determinada localidad es a través de la construcción de las *curvas de distribución de frecuencia de iluminancia* a partir de los datos recogidos en las estaciones meteorológicas [50] [224], en los *archivos climáticos normalizados* o en otras fuentes de datos reconocidas. En este sentido, los proyectos europeos *Satel-Light* y *SODA* han supuesto un gran avance en la creación de bases de datos de valores de luz natural y radiación solar en Europa, derivados a partir de imágenes del satélite *Meteosat*, proporcionando de forma gratuita mapas temporales, archivos de datos y valores estadísticos de *irradiancias*, *iluminancias* y de *luminancias* del cielo [Figura 141], siendo de gran utilidad para evaluar la *disponibilidad de luz natural* de cualquier lugar de Europa [254] [268] [269] [270].

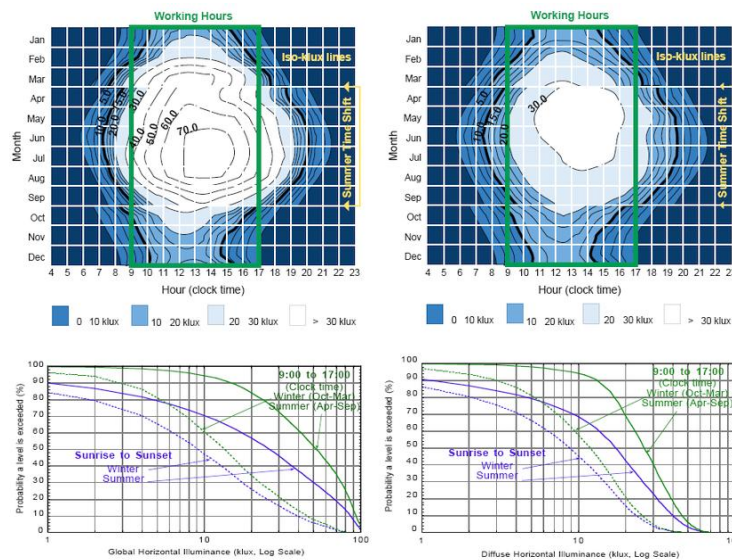


Figura 141: Mapa temporal y Curvas acumulativas de Iluminancias Horizontal Global y Difusa en Lyon [259].

Una vez obtenida la *curva de distribución de frecuencia de iluminancia horizontal exterior difusa*, se puede obtener cuál es el valor mínimo de *DF* que se debe tener en un punto para tener un determinado *nivel de iluminación* mínimo durante un determinado periodo, o bien, fijado el *nivel de iluminación interior* y el *DF*, el porcentaje del año en que se superará dichos valores.

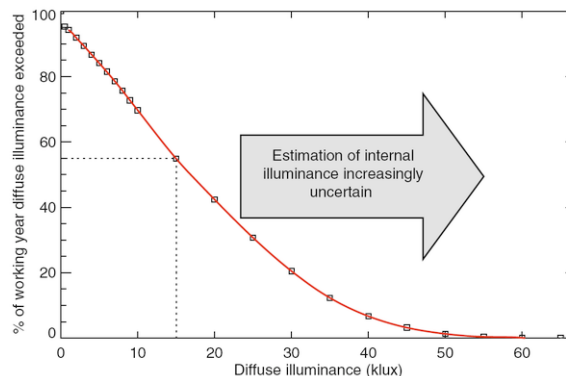


Figura 142: Estimación de la provisión anual de luz natural difusa [1].

Sin embargo, para normalizar el cálculo del *DF* se estableció un determinado porcentaje de probabilidad de valores de *iluminancia horizontal exterior*, dando lugar a la definición de la *iluminancia de Diseño del Cielo (Design Sky Illuminance)*. Esta iluminancia es el valor de iluminancia difusa horizontal exterior que se obtiene con una frecuencia mayor del 85% del tiempo entre las 9'00 h y las 17'00 h a lo largo del año. Esta frecuencia del 85% coincide con la frecuencia en que se obtiene una iluminancia difusa horizontal exterior de 5000 lux en una latitud de aproximadamente 51°N según el ábaco de la Figura 140.

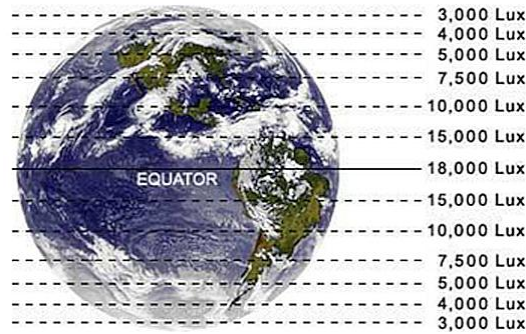


Figura 143: Variación de valores del Cielo de Diseño en función de la latitud [105].

Como el valor del *Cielo de Diseño* se basa en el percentil 15° suele considerarse como el peor escenario para el cálculo de *DF*, de forma que asegura que se obtiene un determinado valor de iluminancia interior durante el 85% del horario diurno de trabajo normalizado.

Debido a la normalización de las condiciones exteriores de iluminación difusa horizontal para el cálculo del *Factor de Iluminación Natural*, y a las exigencias normativas y recomendaciones respecto a los valores mínimos de *DF*, apenas se encuentra literatura sobre la influencia de las condiciones climáticas en las condiciones de iluminación natural cuando se estudia en términos de *DF*.

Sin embargo, con la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)*, los valores de iluminancia obtenidos en un punto en el interior de un espacio varían según los datos recogidos en el archivo climático de la localidad, es decir, que se considera la *disponibilidad de luz natural total* para determinar los *niveles de iluminación interior* [50] [224]. Este hecho es de especial relevancia en aquellas localidades donde prevalecen los cielos despejados con una alta contribución de la luz solar directa.

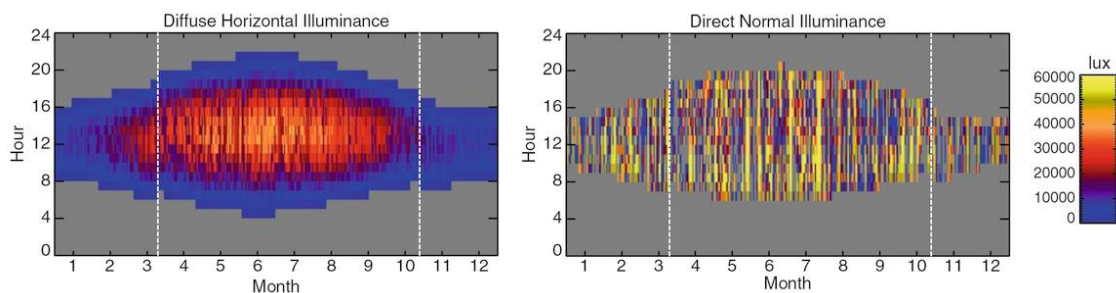


Figura 144: Mapa temporal de Iluminancia Difusa Horizontal e Iluminancia Directa Normal en Nottingham [1].

Como se puede comprobar, el cambio desde el cálculo del *Factor de Iluminación Natural* a la *Modelación climática de la Luz Natural* se fundamenta en la predicción de las condiciones interiores de iluminación natural bajo unos datos más precisos de *disponibilidad de luz natural*, utilizando para ello *archivos climáticos estandarizados*.

Los datos meteorológicos típicos de un año que representen las condiciones climáticas a largo plazo son esenciales para el análisis y simulación del comportamiento energético y estudio de la iluminación natural de un edificio [1] [21]. Como las condiciones meteorológicas varían cada año, cuanto más extenso es el periodo de registro de datos meteorológicos y más recientes son, mejores y más representativos serán los resultados de simulación [267].

Este conjunto de datos meteorológicos registrados a largo plazo se introduce en los programas de simulación a través de los *archivos climáticos estandarizados*, también llamados años climáticos de referencia (*Test Reference Year -TRY, Typical Meteorological Year -TMY, Example Weather Year -EWY*). Un año climático de referencia es un archivo que contiene información horaria de un año (8760 horas) seleccionada para representar un conjunto de patrones climáticos que se pueden encontrar con normalidad en un conjunto de datos meteorológicos medidos durante varios años [1] [271].

Para una determinada localización pueden existir varios tipos de *archivos climáticos estandarizados* (p.ej. *IWEC, DRY, MET, TMY2, TRY, WYEC2*) cada uno de ellos desarrollados por diversas organizaciones para cubrir diferentes propósitos, pudiendo ser utilizados en programas de simulación [272].

Descripción	Pros	Contras
Sólo se utilizan uno o dos archivos	Permite una fácil y sencilla comparación con otros edificios	Puede proporcionar resultados no reales de consumo energético y sobrecalentamiento
Registro climático previa de una localización	Los datos son reales	No permite la creación de archivos representativos
A partir de varios años climáticos	Archivos representativos de las condiciones meteorológicas y climáticas	Ignoran las variaciones naturales y no proporcionan información sobre el rango de dichas variaciones
Sólo están disponibles unas pocas localidades	Es fácil elegir qué archivo utilizar	El archivo climático no es representativo de la localidad donde se ubica el edificio

Tabla 14: Implicaciones de utilizar diferentes archivos climáticos en la simulación de los edificios [271].

La definición de los años de referencia depende del tratamiento estadístico de los datos registrados. Algunos archivos reflejan un año completo (12 meses continuos) como el representativo de todo el periodo de medición, mientras que otros archivos se componen de meses representativos hasta formar una secuencia de 12 meses [271]. La elección de un determinado tipo de archivo climático puede afectar a los resultados de simulación de las condiciones térmicas y de iluminación de los espacios. Por ejemplo, los archivos *TMY2* y *WYEC2* contienen más datos sobre radiación solar e iluminancia que otros formatos más antiguos como *TRY* [273], por lo que afectarán a determinados aspectos del comportamiento del edificio.

Los archivos climáticos formados por uno o dos años meteorológicos registrados realmente no pueden representar un comportamiento climático de un periodo de cierta extensión, por lo que deben evitarse en las simulaciones. Sin embargo, los métodos que producen estos años sintéticos representativos son más apropiados y dan resultados más cercanos a las medias a largo plazo [89].

En este sentido, estudios como los llevados a cabo por *D.B. Crawley* [272] [273] o *A. Iversen* [274] se encaminan a determinar cómo influye la elección de uno u otro archivo climático en los resultados de las simulaciones. *Crawley* [272] observó que la variación media del consumo energético anual debido a la variación del clima es alrededor del 5%, obteniendo mayores variaciones en localidades con climas más fríos como Minneapolis [Figura 145], y las menores para localizaciones con climatología cálida como Los Ángeles y Miami.

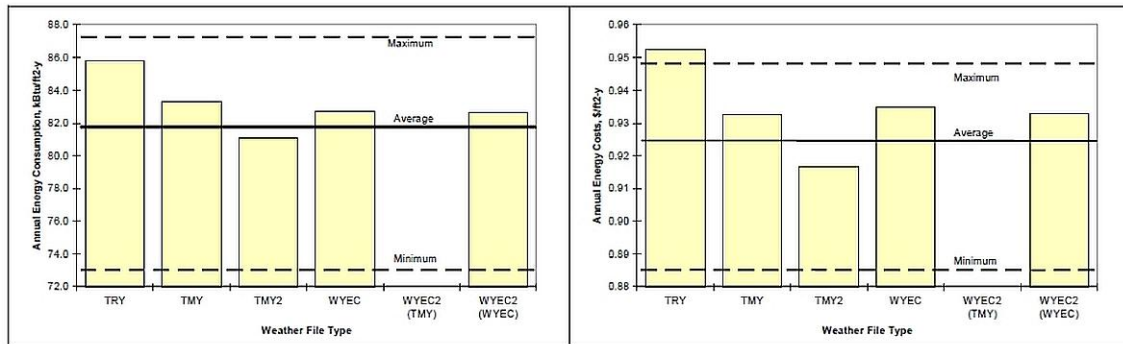


Figura 145: Comparación de los resultados de simulación para diferentes tipos de archivos climáticos y para el clima real en Minneapolis [272].

Como para una misma localidad se pueden encontrar diferentes archivos climáticos, *A. Iversen* [274] exploró cuál era el efecto en la demanda de iluminación artificial de un espacio ubicado en Copenhague utilizando los archivos climáticos *IWEC* (*International Weather for Energy Calculation*), *DRY* (*Danish Reference Year*) y *MET* (*Meteonorm*) como dato de entrada para el modelo de *Cielo General Estándar CIE*.

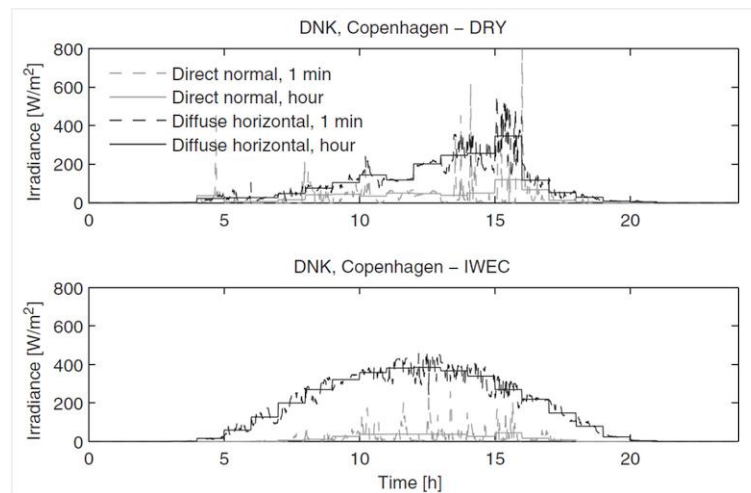


Figura 146: Irradiancia horizontal difusa y directa normal: 18 de Junio en Copenhague. *DRY* e *IWEC* [274].

Al comparar los datos de *irradiación directa normal* y *difusa horizontal* de un día cualquiera en los archivos climáticos *IWEC* y *DRY* de Copenhague y bajo diferentes resoluciones de datos (datos cada hora o por cada minuto) [Figura 146], observó que aunque los valores totales anuales de irradiación eran bastante similares, existían grandes diferencias en la evolución diaria entre ambos archivos. Asimismo al comparar los niveles medios de iluminación exterior entre las 8'00h y las 17'00h que proporcionaban los diferentes archivos climáticos, observó una diferencia relativa de 1'4% entre los archivos *IWEC* y *DRY* y de 0'3% entre los archivos *DRY* y *MET*.

Sin embargo, también observó que las diferencias entre los datos de los archivos climáticos apenas influyen en la demanda anual de iluminación artificial en los puntos de estudio situados al final de la habitación, siendo la desviación estándar relativa menor del 0'7% [274]. Por lo que las diferencias en los valores de irradiación de los archivos climáticos apenas tienen impacto en la evaluación de la demanda de iluminación, ya que los tres archivos proporcionaban resultados similares.

Así como las características de los archivos climáticos pueden afectar a la iluminación natural también pueden afectar a las condiciones higrotérmicas de los espacios interiores. En este sentido, *Yang et al* [275] analizaron las cargas térmicas de refrigeración debidas a la conducción térmica a

través de los elementos constructivos, las *ganancias solares a través de los huecos* [Figura 147] y la carga latente, utilizando un archivo climático *TMY* con los valores medios a largo plazo creados a partir de los datos meteorológicos de diferentes años climáticos, comparados con los perfiles máximos y mínimos para Shanghái. De los tres componentes estudiados, las ganancias solares a través de los huecos son las de mayor incidencia en las cargas de refrigeración, tanto para Shanghái como para las demás ciudades estudiadas.

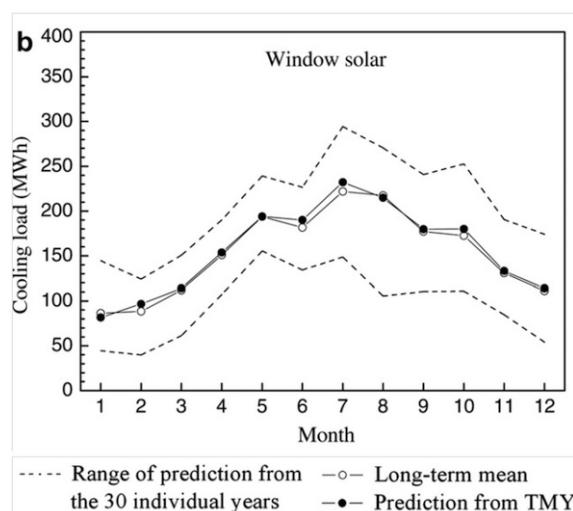


Figura 147: Ganancias solares térmicas a través de los huecos en función del tipo de archivo climático [275].

También *Wong et al* [267] estudiaron el efecto de diferentes archivos climáticos sobre el consumo energético mensual y anual. Utilizaron archivos climáticos *TRY* y *TMY* desarrollados a partir de datos meteorológicos registrados entre 1979 y 2008 y compararon los resultados con los obtenidos a partir de las simulaciones en cada uno de estos años de forma individual. Observaron que, en general, ambos archivos climáticos se aproximan a los valores medios medidos en dichos 30 años. Sin embargo, el análisis de las desviaciones apunta a que el archivo *TMY* es el año climático de referencia más representativo.

En base a estos estudios, es importante señalar la relevancia que tiene no sólo el registro de los datos meteorológicos durante un periodo de tiempo lo suficientemente extenso, sino además, el tratamiento de dichos datos para formar el año climático de referencia para ser utilizado en las simulaciones de los edificios. Esto es más acuciante en cuanto que el cambio climático que se está viviendo actualmente provoca cambios en los valores de temperatura, incrementos en las *ganancias solares*, así como cambios en la humedad relativa y la dirección y velocidad del viento, afectando al acondicionamiento de los edificios.

Para poder predecir el impacto del cambio climático actualmente existen líneas de investigación activas para producir archivos climáticos que reflejen los futuros escenarios, creados a partir de la transformación matemática de datos meteorológicos históricos o utilizando un generador meteorológico [271]. Es, por tanto, esperable que progresivamente vayan apareciendo diferentes archivos climáticos de escenarios futuros que permitan una mejor adaptación de los edificios ante el cambio climático [276] a través de las simulaciones en programas energéticos y de iluminación natural, de forma que se actualicen y complementen los *archivos climáticos estandarizados* actualmente disponibles en diferentes fuentes. Esta actualización derivará en ciertas diferencias en los resultados respecto a las simulaciones que puedan realizarse hoy en día.

Mientras la adecuación de las soluciones constructivas a variabilidad climática parece que está más que asumida en las normativas de acondicionamiento térmico, donde los requisitos de los elementos de la envolvente térmica varían en función de la climatología, expresada también como



zonificación climática [137] [241] [249], la prevalencia, hasta hace poco más de una década, del cálculo de la iluminación natural basado en *iluminancia difusa*, basado en valores de iluminancia exterior de referencia como el *Cielo de Diseño*, ha promovido la expansión indiscriminada de las recomendaciones en cuanto al acondicionamiento lumínico sin atender a la climatología local.

Recientemente, como resultado de los trabajos realizados para la definición del proyecto normativo europeo sobre iluminación natural, *Mardaljevic y Christoffersen* [50] [224] han publicado su opinión sobre la propuesta sobre la adecuación del Factor de Iluminación Natural a las condiciones climáticas para salvar este escollo.

En este trabajo, no sólo determinaron el valor de iluminancia exterior horizontal difusa que se obtiene con un 50% de frecuencia en 34 capitales a través del análisis de sus correspondientes archivos climáticos, sino que también proponen el valor de *Factor de Iluminación Natural* a obtener en cada localización para alcanzar una iluminancia interior de 100, 300, 500 y 750 lux. Así también, y a la vista de los mapas temporales de diferentes localidades, concluyen que la mayor parte del plano de trabajo alcanzan los valores mínimos en un horario de 9'00h a 18'00h. Este horario, por tanto, es propuesto como horario preferente para el horario laboral en Europa.

Con la relativamente reciente aparición de la *Modelación climática de la Luz Natural*, que considera la variabilidad climática local, no es tan común encontrar estudios donde se analicen las condiciones de iluminación natural interior en función de la climatología o la localización del edificio de forma que se puedan establecer diferentes opciones de diseño arquitectónico que mejor aprovechen el potencial de iluminación natural local. Sin embargo, progresivamente van apareciendo trabajos en los que la climatología es una variable más a considerar.

Dentro de los trabajos realizados para el proyecto *COPE (Cost-effective Open-Plan Environments)*, *C.F. Reinhart* [277] estudió la influencia de las condiciones exteriores de luz natural de 186 localizaciones norteamericanas (25 canadienses y 161 estadounidenses) sobre la *disponibilidad de luz natural interior* y la *demanda de iluminación artificial* en espacios de oficinas utilizando *DAYSIM*.

En primer lugar agrupó las 186 localizaciones en cinco regiones con similar potencial de luz natural, cuyos centros climáticos eran Daytona Beach (Florida), Los Ángeles (California), New York City (Nueva York), Winnipeg (Manitoba) y Vancouver (Columbia Británica) [Figura 148]. Simuló un mismo espacio con el archivo climático de cada localidad y obtuvo la distribución de la *Autonomía de Luz Natural (DA)* para cada orientación, diferentes transmitancias visibles de los acristalamientos y con y sin particiones interiores.

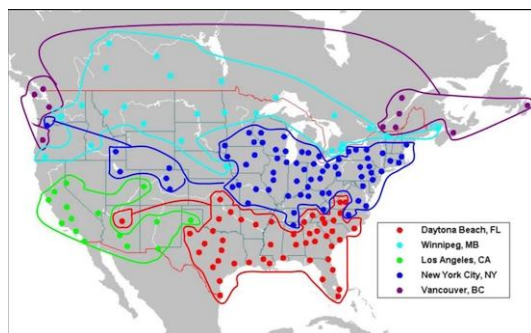


Figura 148: Regiones de Iluminación Natural representadas por sus centros climáticos [277].

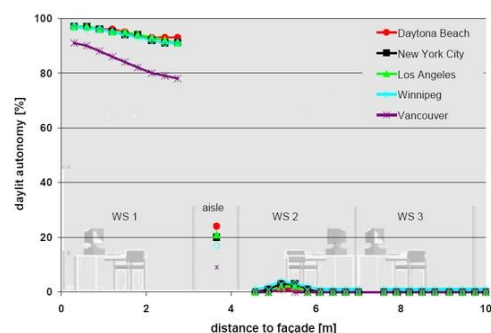


Figura 149: DA para una oficina orientada al Sur en diferentes localizaciones [277].

A partir de los resultados observó que los valores de *Autonomía de Luz Natural* eran muy similares adyacentes a la ventana y que *se provocaban las mayores discrepancias a una distancia del orden de 1 -1'5 veces la altura de la habitación, que coincide con la región de los espacios de*

oficinas en las que las estrategias de diseño interior tienen el mayor impacto en las condiciones de iluminación natural. El análisis de los resultados en estas cinco localizaciones mostró que las mayores diferencias aparecían en los meses de invierno, revelando que el menor *potencial de iluminación natural* de la región de Vancouver se debía a la amplia presencia de cielos densamente nublados durante el invierno [9] [277].

En el trabajo de *H. Shen* y *A. Tzempelikos* [278], se realiza un análisis paramétrico de diferentes opciones de diseño de las fachadas en tres localidades distintas para estudiar su impacto sobre las condiciones de iluminación natural, expresado en clave de *Indicadores dinámicos de Iluminación Natural*. Los resultados obtenidos para las mismas condiciones en las diferentes localizaciones (New York, Chicago y Los Ángeles), muestran que Los Ángeles tiene la mayor *Autonomía de Luz Natural* y la mayor ratio de *Iluminancia Natural Útil (UDI)* entre 100 y 2000 lux, siendo New York la última en el ranking. Los autores señalan que estos resultados se deben a que Los Ángeles se encuentra en una menor latitud y su clima está sujeto a un mayor número de horas de soleamiento. *Para cada localización el valor de DA aumenta a medida que aumenta la superficie de la ventana y la transmitancia visible del vidrio.*

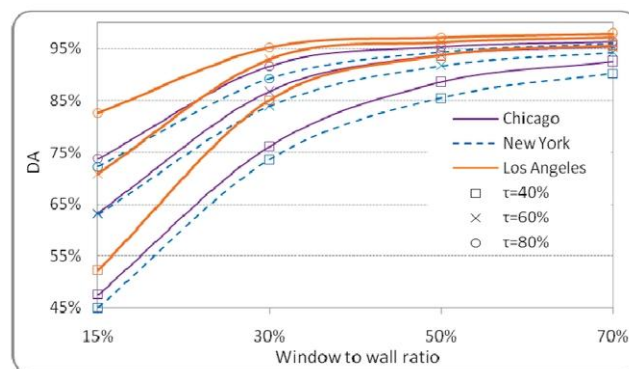


Figura 150: DA en función de la superficie de ventana y su transparencia en tres localizaciones [278].

*A. Iversen* [274] también estudió la influencia de la climatología local de diferentes localizaciones (Copenhague -COP, Ginebra -CHE y Phoenix -PHOE) así como la resolución de los datos de los archivos climáticos (1 hora o 1 minuto), sobre las condiciones de iluminación interior, en particular sobre la *Dependencia de Iluminación (Lighting Dependency -LD)*, que es el indicador complementario a la *Autonomía de Luz Natural*.

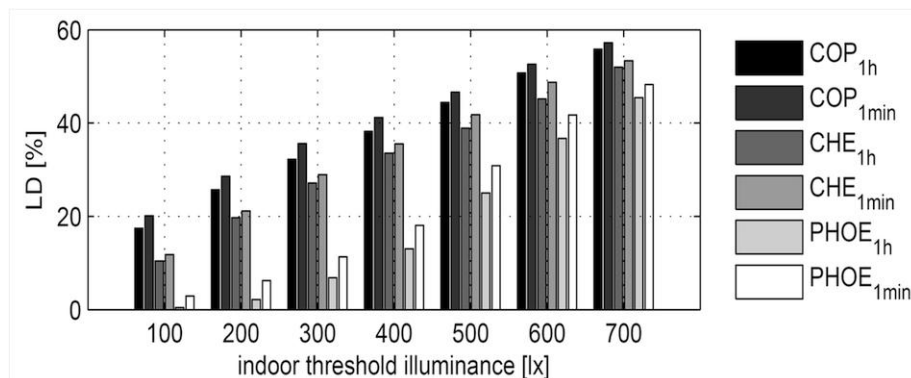


Figura 151: Dependencia de Iluminación para Copenhague (COP), Ginebra (CHE) y Phoenix (PHOE) [274].

Las simulaciones, considerando un control de la iluminación on/off o un control continuo, mostraron que la demanda de iluminación eléctrica se subestimaba cuando se utilizaban datos horarios frente a una resolución de un minuto [274]. *Iversen* concluye que las diferencias en los

valores de *LD* para cada nivel mínimo de iluminancia reflejan la correlación entre el *potencial de iluminación natural* de una zona y su demanda de luz artificial.

*C.M. Muñoz, P.M. Esquivias et al.* [279] estudiaron el efecto y las variaciones que se producían en las condiciones de iluminación natural de un espacio de oficina con dos fachadas opuestas acristaladas al ubicarla en 12 capitales de países dentro de la región 6 de la *Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization -WMO)*, correspondiente principalmente a Europa, más Sevilla (España), siendo ésta la localidad de referencia.

Para ello, utilizando la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)*, y considerando los requisitos de iluminación de un espacio de oficinas (500 lux de *iluminancia media mantenida*), establecieron el criterio para analizar los resultados de *DF* y *DA<sub>500</sub>*, de forma que obtuvieron el porcentaje del plano de trabajo que cumplía con dichos criterios, así como los valores medios para los tres rangos de *UDI*.

En los resultados [Figura 152], se muestra la evolución de los cinco valores obtenidos en cada una de las localizaciones estudiadas. Debido a los datos de iluminancia que representan *DF* y *DA* se puede decir que su diferencia es un indicador de la relevancia de la radiación solar directa en dicha localización.

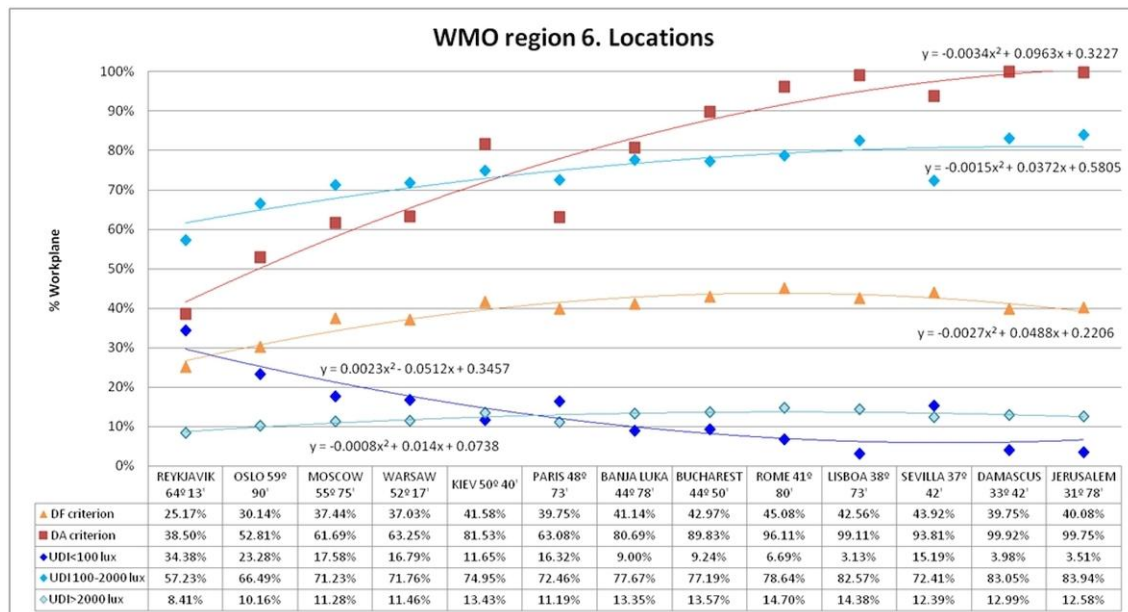


Figura 152: Influencia de la localización en una oficina con fachadas Norte-Sur [279].

La mínima diferencia corresponde a la localización de mayor latitud con un valor del 13%, revelando la menor presencia de radiación solar directa en Reykjavik. Un segundo grupo, con una diferencia de alrededor del 24%, corresponde a las localizaciones con latitudes entre 50° y 60°, salvo Kiev. Las localizaciones con latitudes menores de 50° presentan diferencias entre los valores de *DF* y *DA* de gran relevancia: del 40% para latitudes de 45°, 50% para latitudes alrededor de 37° y hasta 60% en latitudes próximas a 30°.

Estas diferencias muestran la alta frecuencia de días despejados recogidos en los archivos climáticos, y, por tanto la menor adecuación del modelo de Cielo Nublado Estándar CIE, y por ende del Factor de Iluminación Natural, para el cálculo de las condiciones de iluminación natural.

La climatología propia de la localización condiciona la disponibilidad de iluminancia difusa y total procedente de la bóveda celeste, así como la radiación solar térmica que entrará en el edificio en forma de *ganancias solares*. Por lo que mientras *en las regiones del norte de Europa es posible*

*seguir considerando sólo la iluminancia difusa debido a la relativamente escasa diferencia con respecto a considerar la iluminancia total, en las regiones del Sur, con latitudes menores de 50°, se debería considerar siempre la iluminancia total en los estudios de iluminación natural, debido a la gran diferencia en los resultados de  $DF$  y  $DA$ , lo cual posiblemente también se reflejará en la relevancia de las ganancias solares a través de los huecos en las condiciones térmicas de los edificios ubicados en dichas localizaciones. En cualquier caso, si se opta por calcular  $DF$  por su simplicidad, debería aplicarse un cierto coeficiente de mayoración de los resultados [279].*

## 2.4.2 Potencialidad del emplazamiento

En las primeras fases del proyecto arquitectónico, cuando se está considerando la localización del futuro edificio, es importante tener en cuenta no sólo la disponibilidad de luz natural, determinada por las condiciones climáticas locales, sino también cómo los elementos construidos alrededor de dicha localización pueden afectar a las condiciones ambientales interiores [226] [257] [280] [281] [282], de forma que se puedan tomar decisiones que permitan el máximo *aprovechamiento de la luz natural* en un rango de iluminancias que sean útiles para llevar a cabo las diferentes tareas visuales que sean necesarias.

La presencia de los elementos del entorno, como otros edificios, árboles o accidentes geográficos actúan como obstrucciones al acceso de la luz natural a los edificios, bloqueando tanto la luz solar directa proveniente del sol como partes de la bóveda celeste [3], que actúa como fuente de radiación difusa.

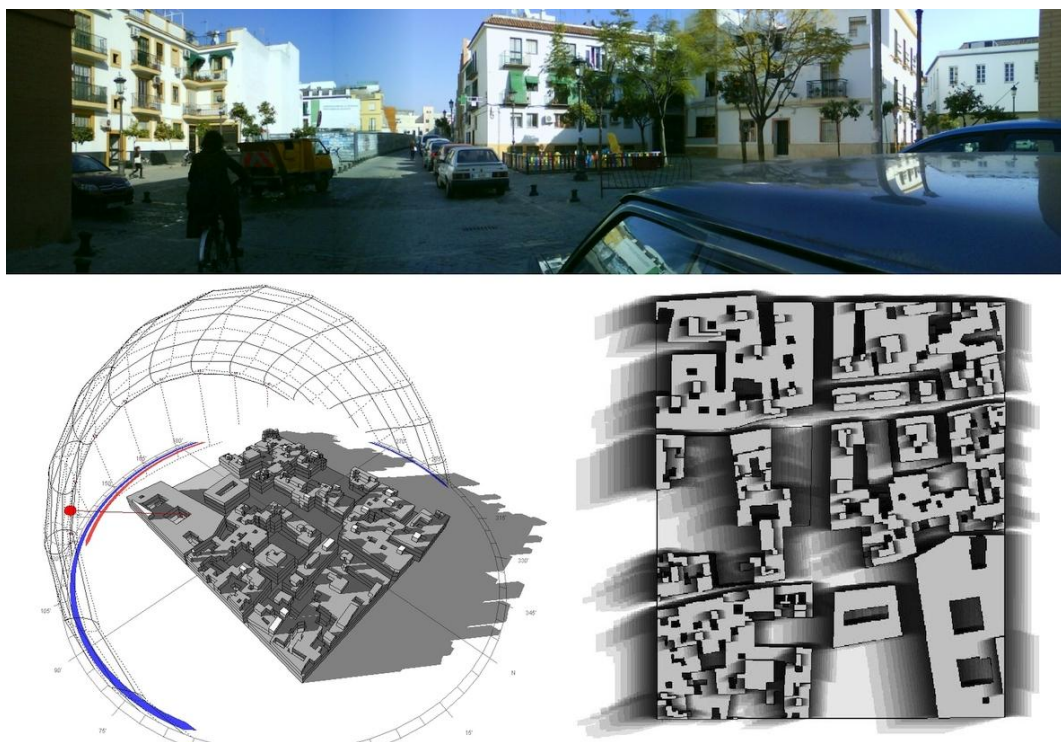


Figura 153: Potencial de acceso solar del emplazamiento. P.M. Esquivias. PFC.

Debido a su potencial contribución a la iluminación natural, y debido a su direccionalidad, el estudio de la posición solar es crucial, ya que la orientación de las fachadas que contienen a los huecos determinará el acceso a la radiación solar de los edificios, no sólo por cuestiones lumínicas, sino también para aprovechar dicha radiación en invierno para obtener una calefacción pasiva del edificio y diseñar las adecuadas protecciones para la época estival [3].

Debido a las características del *Cielo Nublado Estándar CIE*, con una distribución de luminancias simétrica cilíndricamente, el *Factor de Iluminación Natural (DF)* es indiferente a la orientación del edificio. Para tener en cuenta el efecto directo del Sol, y complementar de esta forma el análisis de la distribución de valores de *DF* en el plano de trabajo, se cuenta con los estudios de exposición solar o de soleamiento.

Los efectos de obstrucciones y la orientación en la disponibilidad de luz solar pueden analizarse utilizando para ello los diagramas solares (sun-path diagrams) [27], donde se realiza el análisis anual de las condiciones de soleamiento de un solo punto, o bien en el análisis momentáneo de

todo el espacio a través de la proyección de sombras [3]. Con ambos métodos la orientación y la presencia de obstáculos se hacen más presentes en las condiciones de iluminación natural, pese a que no permiten cuantificar el nivel de iluminación obtenido.

Además, ambos aspectos se definen en las primeras etapas del diseño arquitectónico del edificio, determinando no sólo las condiciones de iluminación natural sino también la exposición a la radiación solar directa a la que se van a ver sometidas las superficies de la envolvente térmica del futuro edificio. Es por ello que el estudio de la orientación y del entorno del edificio son puntos fundamentales, recogidos en numerosos documentos, guías y recomendaciones, y de especial importancia para la arquitectura bioclimática.

#### 2.4.2.1 Elementos del entorno

---

Más de las tres cuartas partes de la población mundial actualmente vive y trabaja en entornos urbanos, siendo éstos cada vez más densos a medida que se fomenta la compacidad de las ciudades. La ciudad densificada proporciona un entorno complejo donde el *acceso solar* y la *disponibilidad de luz natural* se ven cada vez más reducidos, especialmente a medida que aumenta la altura de la edificación [46] [283].

En las ciudades modernas, especialmente en aquellas de alta densidad, la mayoría de los edificios se construyen próximos o adyacentes a los otros, las obstrucciones del entorno urbano suprimen la *componente solar directa* durante algunas, sino todas, las horas del día [281] [284]. Para un determinado emplazamiento, la bóveda celeste estará parcialmente tapada por los elementos que se encuentran alrededor del solar como los edificios próximos, la vegetación o los accidentes geográficos [71]. El impacto de las condiciones del entorno puede ser más relevante que la orientación de las diferentes fachadas, pero no siempre se tiene en cuenta en los estudios de iluminación natural.

Las sombras producidas por los edificios de alrededor pueden ser significativas, de forma que en estos entornos la *componente reflejada* de la radiación solar sobre los mismos puede ser una de las principales fuentes de iluminación natural de los espacios interiores [71] [282]. Además como los edificios del entorno bloquean el *acceso solar*, especialmente durante el invierno, se produce una reducción en las *ganancias solares a través de las ventanas* [46] [283], viéndose reflejada en la demanda energética del edificio [285], por lo que se aumenta el consumo energético del mismo [286], reduciéndose también la entrada de luz directa que puede provocar deslumbramiento en los ocupantes del mismo. Si bien es cierto que los mismos edificios del entorno pueden actuar como «reflectores» de la luz solar, éstos pueden provocar problemas de deslumbramiento tanto en los edificios adyacentes como en el entorno urbano, incluso pueden aumentar las cargas térmicas del entorno, favoreciendo el efecto «isla de calor» [71].

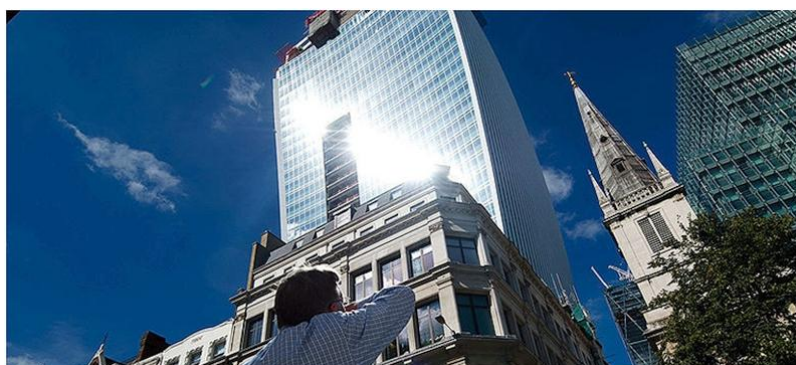


Figura 154: Los edificios del entorno como «reflectores» de la radiación solar.

El planeamiento urbano tradicionalmente busca controlar las proporciones de los espacios públicos, ya que la relación geométrica entre la altura de los edificios y la distancia entre los mismos regula el *acceso solar*. Las ordenanzas municipales y las normas de edificación, por tanto, normalmente establecen los valores límites de dichas proporciones, cuyo origen se remonta a diferentes reglas de oro y recomendaciones, que limitan la obstrucción solar que los edificios pueden provocar en los espacios públicos y en otros edificios [71] [287].

En los climas cálidos y secos es particularmente importante tener en cuenta la orientación y las obstrucciones del entorno, no sólo para asegurar una recepción mínima de luz natural [251], sino para evitar el exceso de calentamiento de los espacios interiores [280]. Especialmente en los climas más extremos es importante adecuar el diseño arquitectónico a las condiciones ambientales exteriores para reducir en lo posible la demanda energética de los sistemas térmicos y de iluminación artificial [288] [289].

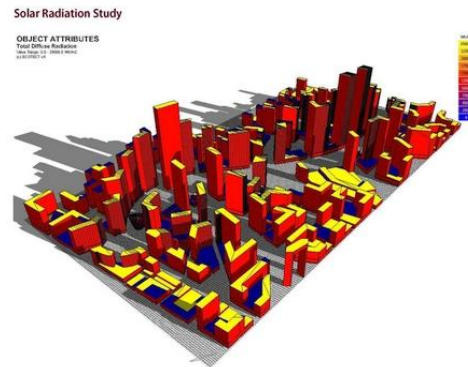


Figura 155: Bloqueo del *acceso solar* de los edificios en un entorno urbano debido a otros edificios.

Sobre las condiciones del entorno se pueden distinguir dos campos de investigación diferenciados. Por un lado el estudio y diseño de los espacios exteriores, especialmente de la relación altura del edificio-ancho de la calle (urban canyon), para obtener unas condiciones exteriores más cercanas al rango de confort, mitigando el efecto «isla de calor», el deslumbramiento, la excesiva presencia de sombra o el efecto «túnel de viento» [283] [290] [291] o para mejorar el aprovechamiento de las energías renovables [292] [293].

Por otro se encuentra el estudio y análisis de la influencia del entorno urbano en las condiciones ambientales interiores y en el consumo energético de los edificios [16] [285] [294] [295], especialmente en las ciudades de alta densidad construida, siendo objeto de especial investigación, como demuestran los estudios centrados en las ciudades asiáticas, especialmente en Hong Kong, destacando los trabajos de *J.C. Lam, D.H.W. Li o E. Ng* [211] [282] [286] [296] [297]. Sin embargo, los trabajos realizados por la Universidad de Hong Kong parecen centrarse más en la determinación *Factor de Iluminación Natural Vertical (DFv)* y la reducción del mismo debido al entorno urbano.

*N. Lukman* [226] analiza de forma paramétrica el efecto de los ángulos de obstrucción frontal, desde 5° a 80° desde la altura del alféizar de la ventana, en incrementos de 5°, sobre las variaciones en el nivel de iluminación natural en el eje central de tres tipos de habitaciones diferentes, con diferentes alturas libres y superficies de ventana, bajo *Cielo Nublado Estándar CIE* y cielo despejado al mediodía del solsticio de invierno, considerando dos coeficientes de reflexión diferentes de la obstrucción colocada frente a las ventanas.

En condiciones de *Cielo Nublado Estándar CIE*, *el nivel de iluminación tiende a reducirse a medida que se aumenta el ángulo de obstrucción*, produciéndose una reducción más drástica más allá de un ángulo de obstrucción de 30°. *Bajo cielo despejado la tendencia es diferente: el nivel de iluminación aumenta con el ángulo de obstrucción debido a la entrada de una mayor componente reflejada en la superficie exterior*. Los autores señalan como *ángulo de obstrucción crítico el de 30°*, ya que a partir de este punto se producen reducciones del nivel de iluminación de más del 10% y el 40% al lado de la ventana y al fondo de la habitación. También señalan que este ángulo de obstrucción *crítico es aproximadamente equivalente a los 20° de obstrucción máxima que sugiere BRE siguiendo la regla de la línea de 25°* [226].

En su trabajo, *N.A. Mesa et al.* estudiaron el efecto del entorno construido sobre la distribución de valores de iluminación de un espacio interior, así como también su efecto sobre el consumo energético de diferentes espacios dentro de un edificio localizadas a diferentes alturas, dentro de un entorno obstruido en Mendoza (Argentina), mostrando cómo el consumo eléctrico disminuía a medida que se ascendía en las plantas del edificio [284].

Los resultados obtenidos para espacios orientados al sur, simulados en Junio a las 12 h, mostraban que sólo cuando la separación entre los edificios era igual a la altura del edificio (relación 1/1), el 87% de los puntos interiores alcanzaban niveles aceptables de iluminación natural. Si la relación entre la distancia y la altura era de 2/3, entonces sólo el 11% de los puntos alcanzaban más de 200 lux, que en términos de superficie útil es similar a la obtenida para una relación de 1/2. En base a los datos obtenidos, los autores recomiendan como *relación óptima entre la separación entre los edificios y sus alturas entre 2/3 y 1* [284].

Sin embargo, poco a poco van apareciendo estudios donde se aplica la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)*, es decir, considerando también la acción de la iluminación proveniente del Sol para conocer el efecto de los elementos del entorno en las condiciones de iluminación natural interior.

En su trabajo sobre las condiciones de iluminación natural en oficinas, *C.F. Reinhart* [277] señala la importancia de los edificios y elementos del entorno del edificio sobre la disponibilidad de luz natural en los espacios interiores, especialmente en las áreas metropolitanas de alta densidad como Nueva York. Definiendo el ángulo de obstrucción como el menor ángulo con la horizontal bajo el cual se puede ver el cielo desde el alféizar de la ventana, *Reinhart* estudia la *Autonomía de Luz Natural (DA)* bajo diferentes ángulos de obstrucción. Los resultados muestran que *a medida que aumenta el ángulo de obstrucción se reduce el área con mayor iluminancia cerca de la fachada provocando una distribución cada vez menos uniforme*.

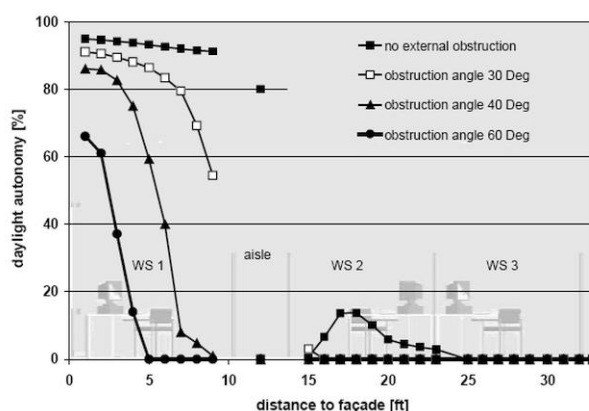


Figura 156: *Autonomía de Luz Natural* debido a la presencia de obstrucciones exteriores [277].

En el análisis paramétrico llevado a cabo por *S. Cammarano et al.* [16] se estudió la influencia de diferentes elementos que intervienen en las condiciones de iluminación natural sobre un espacio de referencia localizado en Turín expresada mediante algunos *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)*, estando el efecto de las obstrucciones exteriores entre ellos.

De su estudio se obtiene que *a medida que aumenta el ángulo de obstrucción del elemento ubicado frente a los huecos se reduce tanto la Autonomía de Luz Natural (DA) como la Iluminancia Natural Útil (UDI) en el espacio*. Esta reducción es menor para ángulos de obstrucción menores de 30°, que se corresponde con valores de *UDI* mayores del 50% del plano de trabajo. Del mismo modo, *para ángulos de obstrucción mayores de 45° la reducción de DA es más drástica y no se alcanza el 50% del plano de trabajo con suficiente luz natural*, lo cual también se refleja en los



valores de  $UDI_{100-2000}$  [16]. Estos resultados en esencia están en concordancia con los resultados obtenidos por Reinhart [277].

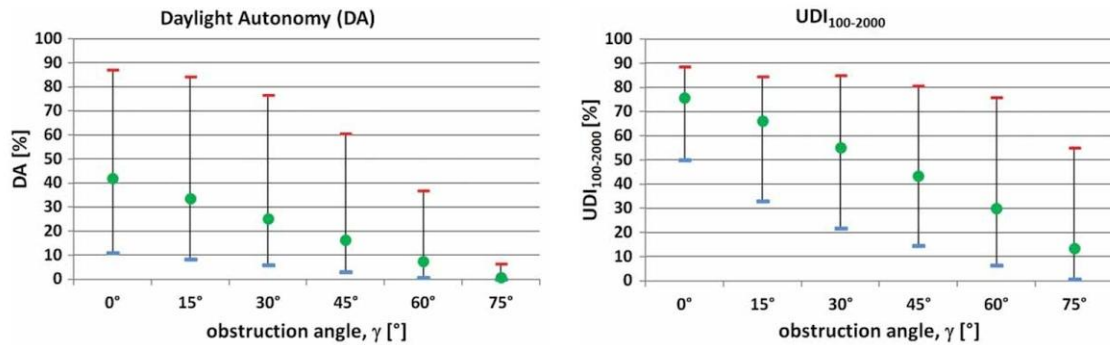


Figura 157: Variación de  $DA$  y  $UDI_{100-2000}$  en función del ángulo de obstrucción frontal [16].

C.M. Muñoz, P.M. Esquivias et al. [279] estudiaron el impacto de la presencia de obstrucciones frente a las ventanas de un espacio de oficina con dos fachadas opuestas sobre sus condiciones de iluminación natural a partir del análisis de los resultados de diversos  $DDMs$  en base a la definición de ciertos criterios de análisis de  $DF$  y  $DA_{500}$  para obtención de una *iluminancia media mantenida* de 500 lux en el plano de trabajo durante el periodo de ocupación del espacio (8'00 a 18'00 h).

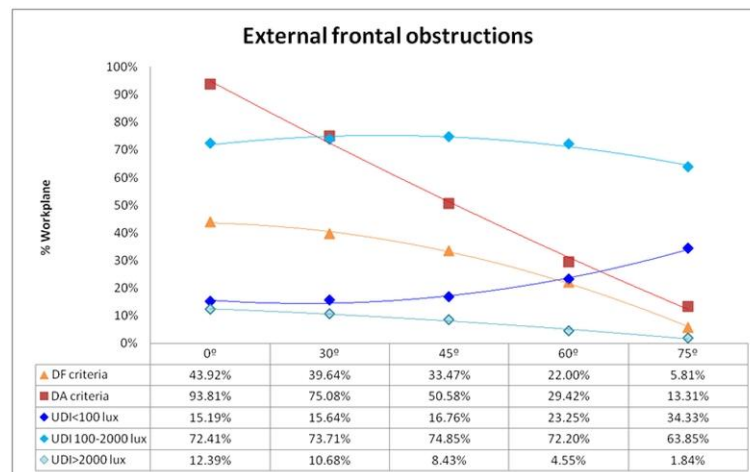


Figura 158: Influencia de las obstrucciones exteriores en una oficina con fachadas Norte-Sur [279].

La presencia de obstáculos frente a las ventanas puede reducir en un 80% el porcentaje del plano de trabajo con una  $DA$  igual o mayor de 500 lux y hasta un 40% el porcentaje que cumple con el criterio de análisis de  $DF$ . Los autores señalan *el ángulo de obstrucción frontal de 45° como el valor límite, ya que combina el máximo valor de UDI con los requisitos mínimos para cumplir con el criterio propuesto para  $DA_{500}$* . Este valor límite además está conectado con las *reglas de oro* utilizadas para asegurar un adecuado *acceso solar*.

### 2.4.2.2 Orientación

Entre los diferentes parámetros que intervienen en el diseño pasivo de los edificios, la orientación es uno de los más importantes y uno de los estudiados con mayor frecuencia desde un punto de vista energético [298]. El nivel de *radiación solar directa* que recibe la fachada de un edificio depende del *azimut* de la pared, es decir, la orientación de la misma y de su inclinación [3]. Ésta además influye en otros parámetros del diseño pasivo de un edificio como el diseño de los elementos de protección solar o el comportamiento de la envolvente [289].

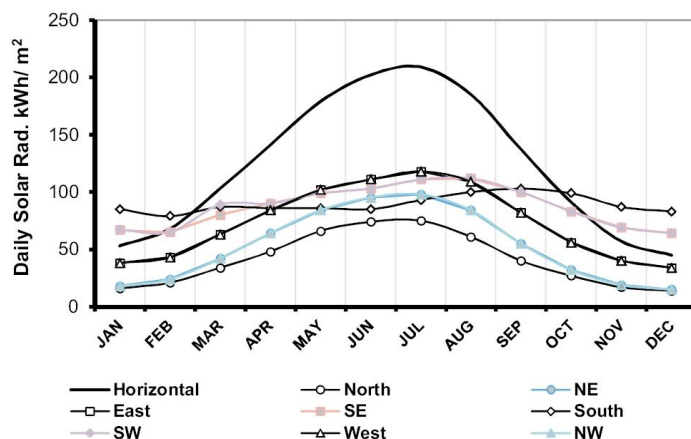


Figura 159: Irradiación global media mensual sobre superficies de diferentes orientaciones (Tesalónica) [299].

Los beneficios que se derivan de una orientación óptima de los edificios son los siguientes [298]:

- Es una medida de bajo coste que se aplica en las primeras fases del diseño arquitectónico.
- Reduce la demanda energética del edificio.
- Reduce el uso de sistemas pasivos más complejos.
- Aumenta el rendimiento de otros sistemas pasivos complejos.
- Incrementa la cantidad de luz natural, reduce la demanda energética de iluminación artificial y contribuye a una menor demanda de calefacción del edificio.

Desde un punto de vista térmico, se reconoce que *la orientación Sur es la óptima para obtener ganancias térmicas en invierno y controlar la radiación solar durante el verano* [3] [27] [46] [300]. Por tanto, como normal general, se recomienda que las mayores superficies de fachada deben estar orientadas al Sur. Sin embargo, la orientación del edificio también debe ser estudiada para optimizar otros parámetros involucrados en el confort ambiental interior [298].

Mientras existen numerosos estudios desde el ámbito térmico respecto a cómo afecta la orientación de los espacios a la demanda y el consumo energético [289], en el ámbito de la iluminación natural, debido a la utilización del Cielo Nublado Estándar CIE, con una distribución de luminancias simétrica cilíndricamente, para el cálculo del Factor de Iluminación Natural (DF), sólo se tienen diferencias de valores cuando los trabajos versan sobre la posición de la ventana a diferentes alturas, entendiendo como cambio de orientación entre un plano vertical y un plano horizontal, pero no existen variaciones entre las diferentes orientaciones para una misma posición de la ventana.

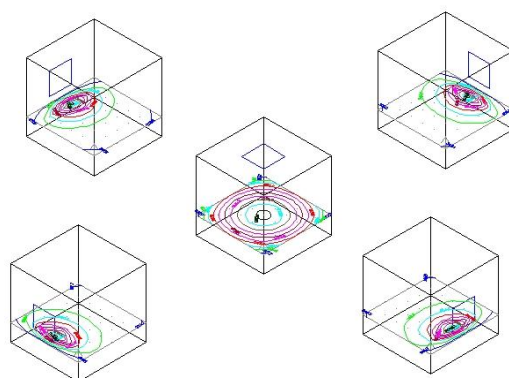


Figura 160: Análisis del impacto de la orientación en base a valores de DF. P.M. Esquivias. TFM

De hecho, las aproximaciones cuantitativas al respecto se encuentran en aquellos trabajos en los que se calcula la distribución del nivel de iluminación para momentos concretos en el año, generalmente utilizando *Radiance*, o bien mediante el cálculo de *Factor de Iluminación Natural* utilizando un modelo de cielo despejado pero eliminando la presencia del Sol, lo cual ya se mencionó anteriormente que es una situación irreal.

En este panorama, y hasta la aparición de la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)*, la literatura relativa al impacto de la orientación en las condiciones de iluminación natural se basa en el conocimiento y el trabajo experimental, así como en las aproximaciones cualitativas, como el estudio de las horas de soleamiento de los espacios. En base a estos trabajos, se obtienen las siguientes afirmaciones:

- *Los lucernarios (orientación cenital) proporcionan una distribución más uniforme de la luz natural, provocando menos problemas de deslumbramiento que aquellos espacios iluminados lateralmente, bajo condiciones de cielo nublado.*

Sin embargo, debido a la gran cantidad de radiación solar incidente sobre las superficies horizontales durante el verano, los lucernarios introducen una considerable carga térmica en el espacio. Los lucernarios con vidrios claros provocan la aparición en el plano de trabajo de áreas con una muy alta iluminación dejando el resto del espacio, por contraste de luminancia, aparentemente infra-iluminados [3].

- *La cantidad de luz que puede entrar por una fachada orientada al Sur es mayor que en cualquier otra orientación [4].*

Cuando una fachada mira al Sur, el Sol estará alto en el cielo durante la parte más calurosa del día en verano, y consiguientemente *la penetración solar podrá evitarse de modo efectivo utilizando una adecuada protección solar [27], por lo que esta orientación suele ser la más buscada para la admisión de luz natural [3]*, pese a la mayor variabilidad de la luz que entra a través de dichas superficies [95].

Sin embargo en invierno, con una menor altitud del Sol, las *ganancias solares a través de los huecos* son bienvenidas térmicamente, pero la mayor penetración solar es inaceptable para la realización de tareas visuales [3].

- *La orientación Norte debido a que recibe luz difusa proveniente de la bóveda celeste más uniforme que en cualquier otra orientación [95] es la siguiente orientación más buscada, pese a que no recibe radiación solar directa (salvo contados casos) [3].*

Sin embargo, en las fachadas orientadas al Norte, las pérdidas de calor a través de los huecos suelen ser bastante representativas, cuestión a tener en cuenta para la obtención del confort térmico de dichos espacios [4] [27].

- *Las orientaciones Este y Oeste sólo están expuestas a la radiación solar directa durante la mitad del día, haciendo más difícil el diseño de un acristalamiento óptimo.*

Ambas orientaciones experimentan grandes *ganancias solares a través de sus huecos* a horas indeseadas, mientras que apenas proporcionan calefacción solar pasiva en invierno [4]. Por eso, suele minimizarse la superficie de fachada orientada bien al Este como al Oeste [3].

- *La orientación sudoeste es la más difícil* debido a que la luz solar no solamente es intensa en primavera y otoño, provocando problemas de sobrecalentamiento, sino que también tiene un bajo ángulo de incidencia, lo que la hace difícil de proteger [27].

Los estudios sobre iluminación natural donde se considera la luz natural generalmente se enfocan más a la obtención de los ahorros energéticos en iluminación artificial que en determinar las condiciones de iluminación; comprensible en cuanto que la métrica disponible hasta entonces para el estudio de luz natural no tiene en cuenta la orientación y el estudio de los ahorros de iluminación natural se lleva generalmente a cabo mediante la simulación energética de los edificios, luego era el medio disponible para vincular las condiciones de iluminación natural a la variabilidad inherente a las condiciones climáticas y a la orientación del espacio.

Como ejemplo de este panorama, *Bodart y De Herde* [10] estudiaron la relación entre diferentes decisiones de proyecto, como la orientación y el consumo de iluminación artificial. Los autores señalan que *las habitaciones orientadas al norte siempre tienen el mayor consumo energético de iluminación, estando a continuación las habitaciones orientadas al este, oeste y terminando con las habitaciones orientadas al sur*. También señalan que cuando existe una gran *disponibilidad de luz natural* debido a grandes superficies acristaladas con una alta transparencia el efecto de la orientación apenas es apreciable [9].

Como se ha comentado anteriormente, la aparición de la *CBDM* ha supuesto un cambio en cuanto al estudio de la iluminación natural, ya que los resultados dependen de la variabilidad climática local y de la orientación, considerando la trayectoria solar horaria y diaria.

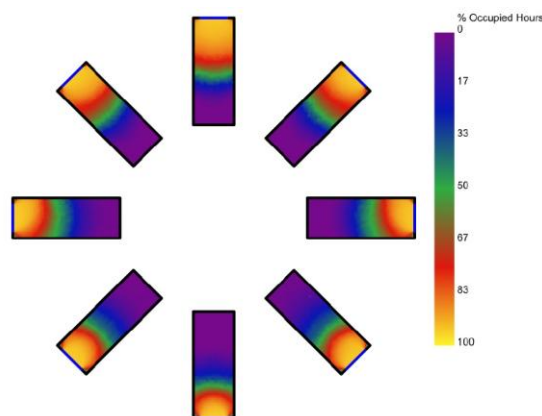


Figura 161: Análisis de la *Autonomía Espacial de Iluminación Natural* para diferentes orientaciones [301].

En su trabajo, *H. Shen y A. Tzempelikos* [278] señalan a la orientación del edificio como una variable importante en las condiciones de iluminación natural de un espacio. Los resultados obtenidos, expresados en términos de *DDMs*, muestran las variaciones de *DA* para un espacio localizado en Chicago bajo las principales orientaciones.

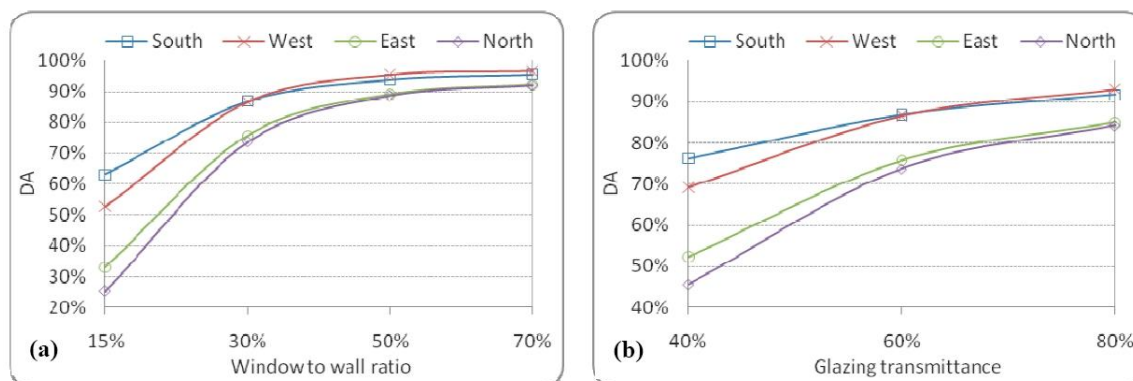


Figura 162: *DA* en función de la superficie de ventana (transmitancia visible 60%) y de la transmitancia visible del vidrio (30% superficie ventana-pared) en las principales orientaciones [278].

Tal como esperaban los autores, *DA* es mayor cuando la fachada se orienta al Sur. Además, para cada orientación, *el valor de esta métrica aumenta a medida que aumenta la superficie relativa de ventana respecto a la pared y con la transmitancia visible del vidrio.*

Respecto al rango útil de la métrica *UDI*, entre 100 y 2000 lux, los autores decidieron subdividirlo en tres partes, 100-500 lux, 500-1000 lux y 1000-2000 lux, para realizar un estudio sistemático de los perfiles de iluminación del plano de trabajo. Esta división se basa en que los autores creen que *las iluminancias entre 500 y 1000 lux son las que realmente son útiles, ya que permiten la no utilización de iluminación artificial al mismo tiempo que no provocan deslumbramiento.*

Cuando la fachada se orienta al Sur, el porcentaje de *UDI* disminuye de forma proporcional al aumento de la superficie de ventana, lo cual se explica por el hecho de que las ventanas orientadas al Sur reciben mucha más luz natural que las otras orientaciones, alcanzando iluminancias mayores de 1000 lux. Sin embargo, para las otras tres orientaciones, una mayor superficie de ventana incrementa el valor medio de iluminancia, hasta que estos valores superan el rango entre 500-1000 lux, ya sea por exceso o por defecto.

*M.C. Dubois y K. Flodberg* realizaron un análisis paramétrico utilizando la *CBDM* para determinar la superficie de ventana más adecuada en función de diferentes variables de diseño como la orientación en espacios de oficinas localizados en latitudes altas (>50°N) [302]. Los resultados se expresan en términos de *DA* y *Autonomía Continua de Luz Natural (DAcon)*, un indicador derivado del primero, y muestran que *la orientación Sur tiene el mayor potencial de DA de forma continuada pero también tiene el mayor riesgo de deslumbramiento.* La orientación Norte sin embargo, tiene el menor potencial pero tampoco tiene riesgo de tener situaciones de deslumbramiento mediante la entrada de luz solar directa y las orientaciones Este/Oeste tienen un comportamiento similar, obteniendo valores entre las orientaciones Norte y Sur.

*S. Cammarano et al.* [16] realizaron un análisis comparativo sobre la influencia de diferentes parámetros que intervienen en la iluminación natural de un espacio localizado en Turín utilizando la *CBDM*, estando la orientación entre dichos parámetros.

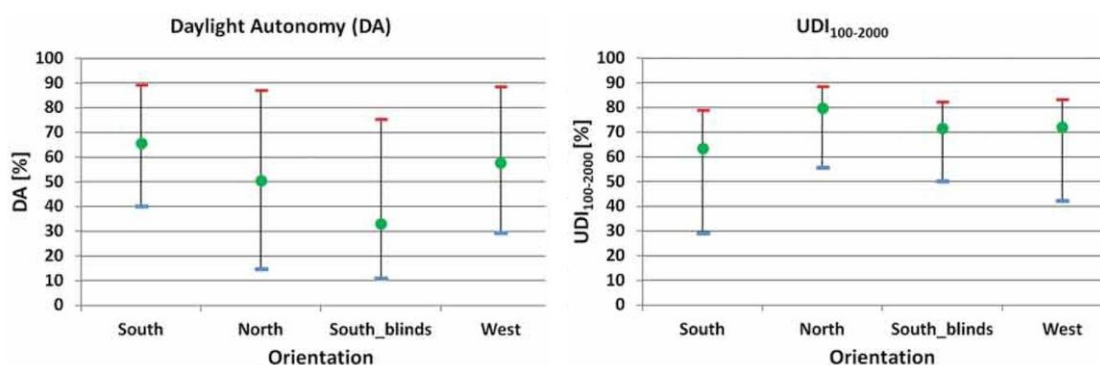


Figura 163: Efecto de la orientación expresado en valores de *DA* y *UDI*[16].

Los autores concluyeron que, *considerando una iluminación mínima de 500 lux, la Autonomía de Luz Natural la orientación Sur es la que obtiene los mayores valores siendo la orientación Norte la que proporciona el valor mínimo.* En términos de *UDI*, sin embargo, es la orientación Norte y la orientación Sur con presencia de persianas las que proporcionan los mayores valores en el periodo de ocupación del espacio.



### 2.4.3 El proyecto arquitectónico

El proyecto arquitectónico determina las estrategias de iluminación natural y el *potencial de iluminación natural* de cada una de las zonas o espacios del edificio [71]. La Arquitectura es la que le da forma al ambiente luminoso [4]. Para proporcionar una adecuada iluminación natural, durante las fases de diseño se deberían fijar los requisitos de iluminación natural de los espacios, comprobar la proporción entre la superficie de ventana y el espacio que ilumina [71], así como comprobar otros tantos parámetros o estrategias arquitectónicas.

A falta de un estudio específico, las *reglas de oro* y las recomendaciones juegan un papel muy importante en la elaboración de los primeros bocetos y predimensionados. Sin embargo, también deben combinarse con los demás requisitos normativos. Los referentes a las cuestiones térmicas cada vez se centran más en un adecuado diseño arquitectónico para conseguir edificios con la menor demanda energética posible.

En el proyecto arquitectónico, la *exposición a la radiación solar*, en su vertiente lumínica y térmica, deben ir de la mano para conseguir un equilibrio entre las condiciones de iluminación natural y de insolación de los espacios interiores en función de los requisitos específicos de cada uno de ellos.

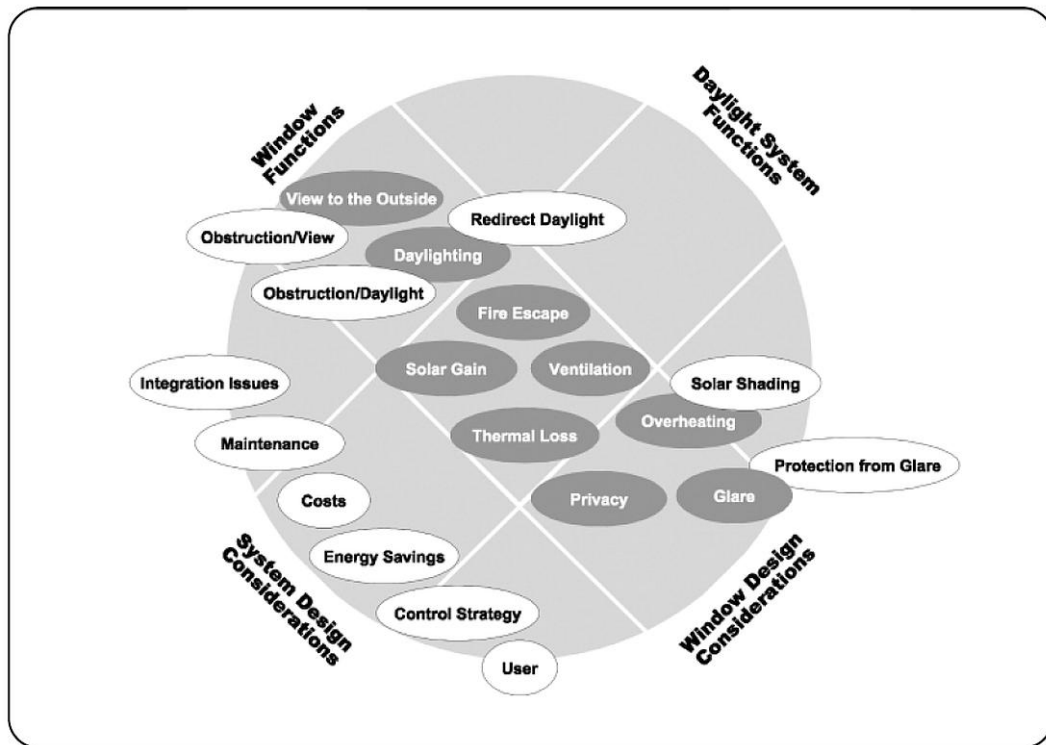


Figura 164: Funciones y consideraciones de diseño de las estrategias de iluminación natural [71].

Las principales funciones de las estrategias de iluminación natural son proporcionar una adecuada cantidad de iluminación, muchas veces mediante la redirección de la luz natural hacia las zonas que lo necesiten, evitar situaciones de excesiva iluminación y *luminancia* que provoquen situaciones de deslumbramiento y prevenir el sobrecalentamiento de los espacios mediante una adecuada protección solar [71], además de considerar otros aspectos como su interacción con los usuarios, su incidencia en el consumo energético del edificio o su mantenimiento.

Los elementos de la envolvente del edificio que intervienen en las condiciones de iluminación natural de los espacios interiores se clasifican generalmente en elementos de admisión y elementos de control de la luz natural [4].

Los elementos de admisión de la luz natural en el espacio son principalmente los huecos, ya estén dispuestos en las paredes verticales como en la cubierta del edificio, pudiendo variar su tamaño, localización en el paramento y la forma. Dentro de los elementos de este grupo se encuentran las ventanas, los lucernarios, los balcones, los muros cortinas o las linternas.

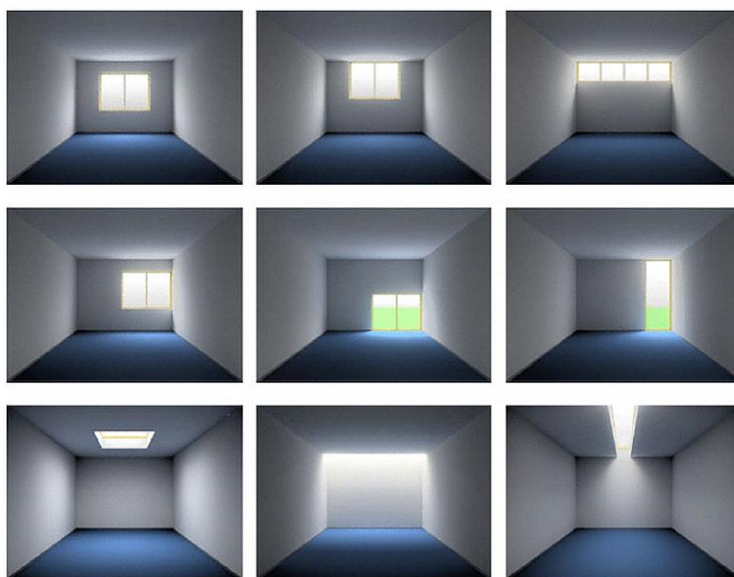


Figura 165: Múltiple disposición de las ventanas [303].

Los elementos de control son dispositivos especialmente diseñados para controlar la entrada de luz a los espacios interiores donde se desarrollan las tareas visuales. Éstos se caracterizan por su localización, su movilidad y sus propiedades ópticas. Pueden ser elementos interiores que separen dos ambientes, como las particiones interiores acristaladas, o elementos aplicados en los huecos como los elementos textiles (toldos y cortinas), filtros solares o protecciones solares fijas como los voladizos, las lamas o las celosías.

Sin embargo, no podemos olvidar que la variabilidad de la luz natural y de la insolación hace que sea muy complicada su consideración en el diseño arquitectónico. De hecho, considerando que la base de cálculo del *Factor de Iluminación Natural* representa una situación «controlada» de las fuentes de iluminación natural y que se ha expandido la creencia de que ésta representa la peor de las condiciones de iluminación natural, actualmente el proyecto de iluminación natural de un edificio consiste en el análisis de la distribución en el plano de trabajo de los valores de DF en combinación con el análisis de las horas de soleamiento, obtenido mediante cartas solares. Es decir, actualmente el proyecto de iluminación natural se basa en condiciones de cielo nublado, determinando principalmente el tamaño de los huecos, y se matiza con las condiciones de cielo despejado, que determina el diseño de las protecciones solares.

En realidad, esta estrategia de diseño es muy similar a la que se establece para la limitación de la demanda energética. Tal como se concibe la normativa energética en España, el acondicionamiento térmico de un edificio se basa en las condiciones de invierno, corregido principalmente por elementos de obstrucción a la entrada de la radiación solar en el espacio para el periodo de verano.

En general, una vez definida la relación del edificio con su entorno inmediato expresado mediante los primeros bocetos formales, se puede decir que las condiciones de iluminación natural de los espacios de un edificio depende de la capacidad de la envolvente del edificio para «captar» la luz natural, mediante el diseño de sus huecos y las correspondientes protecciones solares [71].



La envolvente del edificio tiene la función de regular la relación entre las condiciones exteriores y las interiores. Considerando la iluminación natural, son los huecos ubicados en la envolvente los elementos de admisión de luz natural permitiendo la entrada de la misma en los espacios, sin olvidar que la entrada de luz natural también conlleva la entrada de radiación solar térmica, conocida como *ganancia solar*.



Figura 166: Espacio Andaluz de Creación Contemporánea (Córdoba, España), Nieto y Sobejano 2012.

Desde el punto de vista de la iluminación natural [3], los huecos deben:

1. Permitir la adecuada admisión y transmisión de la luz
2. Procurar una cierta uniformidad de la *iluminación*
3. Controlar la exposición a la luz solar directa del plano de trabajo
4. Controlar el contraste de *luminancias* en el campo visual de los ocupantes, especialmente entre la *luminancia* de los huecos y la de las superficies cercanas
5. Minimizar la posibilidad de aparición de situaciones de *deslumbramiento perturbador*
6. Minimizar las excesivas *ganancias solares* y por conducción durante el verano y las pérdidas de calor por conducción en invierno

Estos objetivos algunas veces son contradictorios, y su relevancia individual varía con la orientación, la estación, la hora del día, la climatología y las cargas térmicas del edificio. Esta complejidad requiere un estudio específico de las características geométricas de las ventanas, así como de la selección del tipo de acristalamiento que mejor se adapte a los objetivos a conseguir [3].

La reducción del espesor de las paredes exteriores y el incremento de la superficie de ventana en la arquitectura moderna hace que sea más difícil el diseño de unas buenas condiciones de iluminación natural, siendo necesaria la utilización de elementos de control, es decir, elementos de protección solar, no sólo para evitar el sobrecalentamiento de los espacios interiores sino también para controlar el *nivel de iluminación interior* y evitar que se produzcan problemas de

*deslumbramiento* [9]. De hecho, el control del *soleamiento* y de las *ganancias solares a través de los huecos* implica una configuración diferente por cada orientación debido al movimiento diario y estacional del Sol [3].

Además, no podemos olvidar que la mayoría de estos elementos, que dependen del proyecto arquitectónico, son muy difícilmente modificables una vez que el edificio ya se ha construido [153]. De hecho, las acciones que se pueden tomar en la rehabilitación de los edificios para mejorar sus condiciones de iluminación natural suelen estar bastante restringidas. Es por ello que el proyecto arquitectónico es el elemento clave para definir las futuras condiciones de iluminación natural y de insolación de los espacios, y, por tanto, deberían considerarse con especial atención durante las fases de diseño [152].

### 2.4.3.1 Elementos de admisión de luz natural: los huecos

Los huecos son aperturas en las superficies de la envolvente del edificio que permiten la interrelación entre el ambiente exterior y las condiciones ambientales interiores. Los huecos permiten el intercambio luminoso, térmico y acústico, además de proporcionar ventilación natural y visión del entorno exterior [27] [133].

Una de las principales funciones de los huecos es la proporcionar luz natural a los espacios, determinando la penetración y distribución de la misma [71]. Desde el punto de vista de la iluminación natural, el hueco se caracteriza por su tamaño, su forma, por su posición y distribución en el paramento que lo contiene y por la transparencia del material con que se realiza [4] [9].

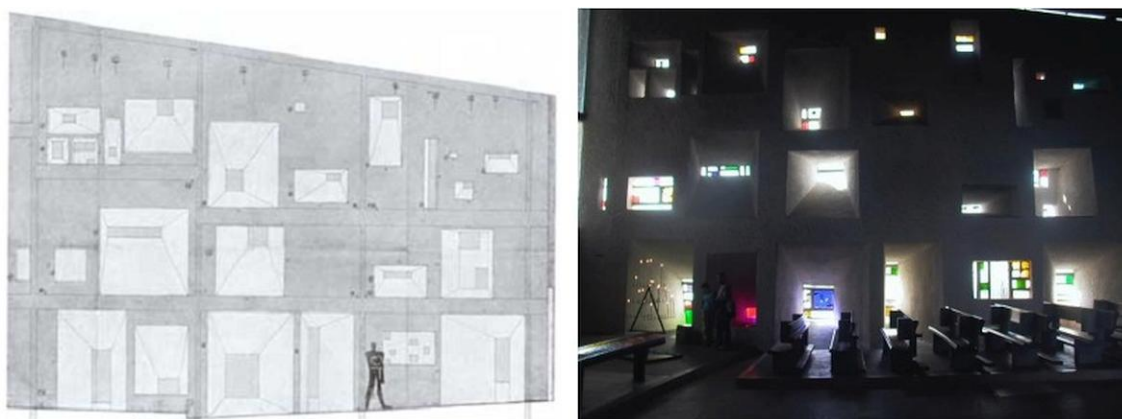


Figura 167: Distribución de huecos en el muro Sur de la capilla de Notre Dame du Haut Ronchamp (Francia). Le Corbusier 1954.

Existen muchos estudios enfocados en las características de los huecos, especialmente su tamaño [60] [302] [304] [305] [306] y el tipo de acristalamiento [133] [304], para diferentes climas, orientaciones y configuraciones de fachada [303] [307] [308], para optimizar su efecto sobre diversos aspectos como la *disponibilidad de luz natural* interior [16] [277] [278], el confort visual [309], el bienestar y la salud de los ocupantes [15] [11] [310], el ambiente térmico [134] [311] [312] o la eficiencia energética de los edificios [10] [144] [253] [313] [314] [315]. Normalmente, cada aspecto se ha estudiado individualmente o bien combinados en investigaciones donde se integran diversos objetivos.

El tamaño de los huecos, así como la forma, posición y distribución de los huecos en la superficie de la envolvente afecta cuantitativa y cualitativamente a las condiciones de iluminación natural de diversas formas [3]:

- La iluminancia en un plano se ve reducida por el coseno del ángulo de incidencia. Aplicando este principio al plano horizontal de trabajo significa que *los lucernarios*

*proporcionan más iluminación en dicho plano comparadas con las ventanas ubicadas a la misma distancia del mismo.*

- Mientras que los lucernarios proporcionan mayores niveles de iluminación, también son más susceptibles de provocar reflexiones cegadoras. Además pueden reducir drásticamente el contraste de luminancias requiriendo más iluminación para llegar a condiciones de confort visual. Por lo tanto, la menor probabilidad de reflexiones cegadoras que se obtiene con las ventanas equilibra la menor cantidad de luz que proporcionan.
- La presencia de los huecos en el campo visual de una persona representa una superficie de alta luminosidad. Si la ventana tiene una posición baja en el campo visual puede ser una fuente de deslumbramiento directo por la visión directa de superficies exteriores brillantes. *Al colocar las ventanas tan altas como sea posible, la superficie deslumbradora se ubica fuera del campo visual, además de permitir una penetración más profunda de la luz solar directa, que puede provocar deslumbramiento al incidir sobre las superficies interiores.*
- *Las mayores superficies de hueco reducen la definición de sombras, contraste y texturas, proporciona una distribución más uniforme de la luz y reduce las reflexiones deslumbradoras.*

El diseño de los huecos, además de otros aspectos, desde la crisis energética se ha relacionado con su incidencia sobre el ahorro energético en iluminación artificial de los edificios. En este sentido, *Bodart y De Herde* [10] destacan la gran influencia de la superficie y posición de los huecos en la distribución de la luz natural en el espacio y en la reducción del consumo energético. De hecho, tal como señalan *Gratia y De Herde* [253]: “*cuanto más alta se ubique la ventana mayor será la penetración de la luz natural por lo que mayor será el área iluminada naturalmente; siendo la superficie de la ventana el parámetro que más afecta a las condiciones de iluminación natural*” [9] [308]. Sin embargo, generalmente la localización y las dimensiones de los huecos suelen definirse en base a preferencias de índole estética en vez de fundamentarse en el conocimiento de su influencia sobre el ambiente interior [308].



Figura 168: Diversidad y variedad de ventanas. Ventanas del mundo: Oporto. *Andre Vicente Gonçalves*

Evidentemente, la influencia de la orientación y del tipo y el tamaño del acristalamiento tiene un importante impacto en el consumo energético global del edificio, pero sobre todo los huecos juegan un papel importante en el consumo energético total de los edificios debido a su mayor *transmitancia térmica*, especialmente si es comparada con otros elementos de la envolvente térmica [133]. De

hecho, *B.P. Jelle et al.* [304] señalan que los huecos son responsables del 60% del consumo de energía total de los edificios, mientras que *Büllo-Hübe* afirma que los huecos son responsables del 20-40% del consumo energético de un edificio, según el caso [134].

Desde un punto de vista más global, bajo la acepción de transmitancia se distinguen diferentes facetas de la transferencia de calor a través de los huecos entre los que se distinguen la *transmitancia térmica (U-value)*, que refleja la transferencia de calor por conducción, la *transmitancia visible (Visible Transmittance -VT o  $\tau_{vis}$ )*, que refleja la cantidad de luz que deja atravesar el elemento semitransparente del hueco y se asocia con la transparencia, y la *transmitancia de la energía solar total ( $\tau_{sol,tot}$ )*, reflejando la «transparencia» del hueco a ser atravesado por la radiación solar incidente en todo el espectro electromagnético.

Esta última no sólo considera la radiación térmica que atraviesa el hueco sino también la que es absorbida por la materialidad del propio hueco y luego re-emitada hacia el interior del espacio, conocida normalmente como *Factor Solar -g-L o Coeficiente de Ganancias Solares* [134] [133].

Acrystalamiento	U (W/m <sup>2</sup> K)	Factor solar	Transmitancia visible
Single Clear	5,913	0,899	0,861
Double Clear Air	2,703	0,786	0,704
Double Clear with Argon	2,576	0,814	0,764
Double high solar gain low-e	1,935	0,741	0,686
Triple Clear	1,744	0,703	0,617
Double Low-e Air	1,684	0,639	0,431
Triple with suspended low-e film (argon)	1,124	0,694	0,530
Triple low-e (argon) - deflected	0,748	0,515	0,298
Double low-e (vacuum)	0,634	0,691	0,354
double tint	0,490	0,440	0,470
double high performance tint	0,490	0,500	0,390
double high solar gain low-e	0,370	0,540	0,530
double moderate solar gain low-e	0,350	0,560	0,440
double low solar gain low-e	0,340	0,510	0,300
triple moderate solar gain low-e	0,290	0,470	0,380
triple low solar gain low-e	0,280	0,400	0,250

Tabla 15: Valores típicos de transmitancia térmica, solar y visible de diferentes sistemas de ventana [133] [316].

Sin embargo, más allá de las características físicas de los materiales del hueco, su superficie, forma y ubicación son parámetros determinantes de las condiciones de iluminación natural de un espacio, que, además, son cuestiones propias del diseño del edificio, siendo difícilmente modificable en fases posteriores [309].

### **Tamaño de los huecos**

Normalmente los arquitectos, en su práctica profesional, tienen la impresión de que necesitan diseñar las fachadas de los edificios con grandes superficies de ventana para explotar al máximo la luz natural [9], opción que ha sido posible implementar a partir de la separación funcional de la estructura y la envolvente del edificio. Esto ha llevado a la expansión de edificios cuyas fachadas tienen una gran superficie acristalada, si no lo están totalmente, generalmente con una protección solar muy poco efectiva [307] [317].

Mientras esta creencia puede tener sentido cuando se trata de latitudes altas, también se ha extendido a latitudes más próximas al ecuador [302]. Pese a pretender conseguir unas buenas condiciones de iluminación natural, esta situación provoca, especialmente en climas soleados, el sobrecalentamiento de los espacios interiores en verano, debido a las ganancias solares, un mayor consumo energético debido a las mayores pérdidas de calor por conducción a través de estas

superficies y problemas de deslumbramiento y un ambiente luminoso demasiado brillante debido al exceso de luz natural que entra en el espacio [27] [305] [306] [309] [317].

El tamaño de la ventana ha sido objeto de estudio en numerosos trabajos, tanto del ámbito de la iluminación natural [60] [302] [303] [305] [306] [308] como del ámbito energético, estando relacionada con su implicación en el consumo de iluminación artificial [10] [253] [307] [309] [314] [317] [318], combinando las simulaciones energéticas con los resultados de *Factor de Iluminación Natural (DF)*. Tras la creación de la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)* y el desarrollo de los programas de análisis integrados, este panorama está cambiando, permitiendo un mayor conocimiento de la influencia del tamaño de la ventana sobre las condiciones ambientales interiores [15] [16] [278] [315] [319].

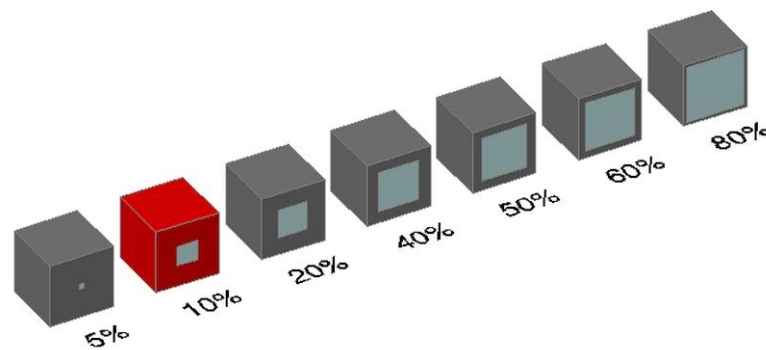


Figura 169: Variación de la superficie de ventana. P.M. Esquivias [319].

En el trabajo de *Büllow-Hübe* sobre la iluminación natural en espacios de oficina en Suecia [306] se estudia el efecto de tres *superficies relativas de ventana respecto a la pared (Window-to-wall ratio -WWR)*: 30%, 60% y 100%. En las habitaciones iluminadas lateralmente, las simulaciones confirman que el nivel de iluminación es mayor cerca de la ventana y se reduce drásticamente a medida que se aleja de la misma, manteniéndose esta norma incluso cuando la fachada está completamente acristalada. También se confirma que *si sólo se aumenta la superficie de ventana, el Factor de Iluminación Natural (DF) aumenta, pero no en proporción directa a la superficie acristalada*.

Una de las razones de este comportamiento es que la luz que se transmite a través de la ventana, plano vertical, no contribuye de forma efectiva a aumentar el *DF*, que se mide en el plano de trabajo a 0,8 m del suelo. La luz natural que entra en el espacio por debajo del plano de trabajo apenas contribuye a los valores *DF* ya que primero incide en el suelo, que absorbe aproximadamente el 70% de su energía [306]. Los resultados también mostraron que las mayores superficies de ventana afectaban negativamente al supuesto ahorro energético además de aumentar el riesgo de deslumbramiento.

Finalmente concluye que *una fachada totalmente acristalada (100% WWR) no proporciona una significativa mayor iluminación natural que la proporcionada por un WWR de 60%*. De hecho, la aparición de problemas de deslumbramiento en las fachadas totalmente acristaladas provoca una mayor utilización de los elementos de protección solar, consiguiendo los mismos niveles de iluminación natural que se hubieran obtenido con una fachada convencional [9] [306] [317].

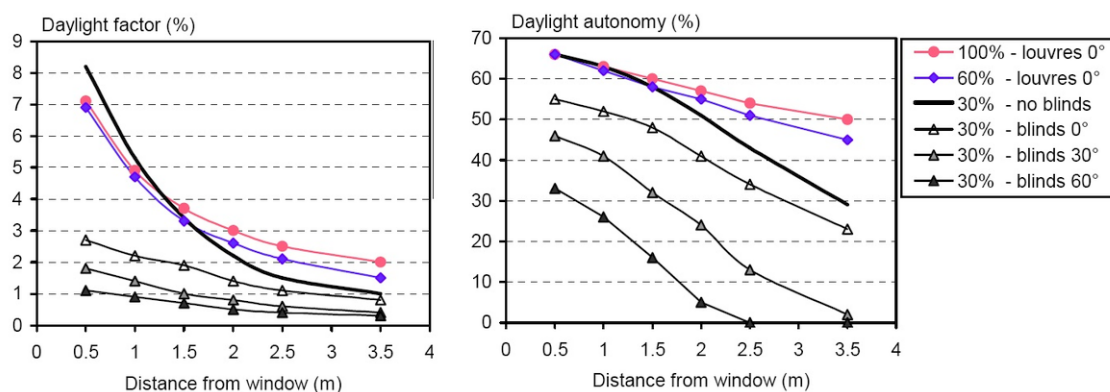


Figura 170:  $DF$  y  $DA_{500}$  para diferentes  $WWR$ , con y sin protección solar [306].

Este estudio se complementa con el expuesto por *Poirazis et al.* [317], que lleva a cabo la simulación energética de un edificio de oficinas completo, pero con las mismas variables que *Büllow-Hübe*. Además de la simulación para los tres tamaños de ventana (30%, 60% y 100%  $WWR$ ), *Poirazis* propone siete alternativas de sistema de ventana variando su *transmitancia térmica* y la presencia de elementos de protección solar.

Sus resultados confirman que *a medida que se aumenta la superficie de la ventana, aumenta el consumo energético total del edificio. Los menores consumos se producen en aquellas alternativas en las que se reduce el Factor Solar de las ventanas*, que aunque aumenta el consumo en calefacción produce mayores reducciones en el consumo de refrigeración, mientras que éste apenas se ve afectado al reducir la *transmitancia térmica* de la ventana [317].

Por lo tanto, los estudios confirman que las grandes superficies acristaladas no implican una mejor iluminación natural o que ésta sea proporcionalmente más abundante, tal como muestran sus resultados [306]. Tampoco implican necesariamente una reducción del consumo energético, ya que en el balance energético se debe contar con la reducción del consumo de iluminación artificial debido a la entrada de luz natural en el espacio, pero también con las variaciones en las demandas de calefacción y refrigeración debido a la entrada de la radiación solar directa [305] [307] [309] [314] [317] [318] [320].

Por otro lado, *una superficie de ventana demasiado pequeña no proporciona una suficiente iluminación natural, aumentando el contraste entre la luz ambiental y la proveniente de la ventana, por lo que es proclive a provocar situaciones de deslumbramiento* [318]. Estas consideraciones son especialmente relevantes en aquellos lugares donde predominan los cielos nublados, existe una alta contaminación atmosférica o la presencia de los edificios del entorno representan un gran obstáculo al acceso solar y la visión del cielo [4].

Sobre la relación entre el tamaño de la ventana y el consumo energético, *Bodart y De Herde* [10] confirmaron que *la menor superficie de ventana proporciona el mayor consumo de iluminación artificial y la mayor superficie de ventana proporciona el menor consumo de iluminación artificial*. Estos ahorros, sin embargo, no incluyen el consumo energético adicional en calefacción y refrigeración debido al aumento de la superficie acristalada, por lo que no proporcionan el balance neto de la influencia de la superficie de la ventana sobre el consumo energético del edificio [9]. También demostraron que *un aumento de la superficie relativa de la ventana respecto al suelo (Window-to-floor ratio -WFR) de 16% al 32% podía reducir el consumo de iluminación artificial un 12% para ventanas con una transmitancia visible del 20% y del 36% con una transparencia del 81% en edificios de oficinas localizados en Bélgica* [10] [253].

De hecho, desde el punto de vista de la iluminación natural, la elección del tamaño de la ventana está muy relacionada con la *transmitancia visible* del hueco [278]. *Thalfeldt et al.* [307] llevaron a cabo simulaciones energéticas y de iluminación de un espacio de oficina para evaluar el impacto de la superficie de ventana, su *coeficiente de ganancia solar*, su *transmitancia visible*, su protección solar y la *transmitancia térmica* de la fachada en el consumo energético.

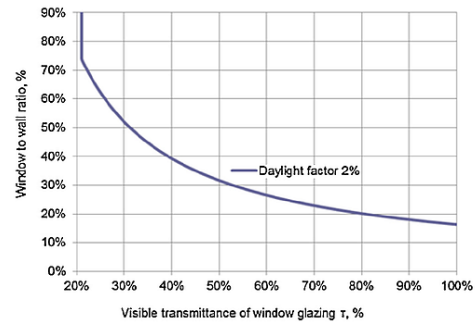


Figura 171: Minimum window to wall ratio depending on visible transmittance of window glazing [307].

Para ello primero determinaron la superficie de ventana aplicando el criterio de 2% de *Factor de Iluminación Medio* para diferentes *transmitancias visibles* del acristalamiento. Los resultados mostraron que *para las ventanas con una alta transmitancia visible la superficie mínima de ventana estaba entre el 21% y el 29'5% WWR*. Los autores señalan que este valor mínimo aumenta a medida que se reduce la transmitancia visible de la ventana [307]. Tras evaluar estos resultados junto con otros factores, energéticos y económicos, los autores concluyen que, en Estonia, para un diseño eficiente y económico, *la superficie de ventana debe ser de aproximadamente el 25% WWR para las fachadas Sur, Este y Oeste y del 40% WWR para la fachada Norte* [307].

Es decir, que para obtener unas condiciones de iluminación mínimas no sólo se debe considerar el tamaño de la ventana y su transmitancia visible, sino también la orientación de la fachada. Cabe señalar cómo en este estudio, donde se utiliza el *Factor de Iluminación Natural* como métrica para expresar las condiciones de iluminación natural, son los resultados de la simulación energética los que señalan la importancia de la orientación de la ventana.

*A. Tzempelikos y A.K. Athienitis* estudiaron el efecto del tamaño de la ventana en la *Disponibilidad Relativa de Luz Natural (Daylight Availability ratio -DAR)* en un espacio de oficina en Montreal y su efecto sobre el consumo de iluminación artificial. Para la selección del tamaño óptimo de ventana en términos de superficie relativa (*WWR*), se basan en tres factores: la habilidad de proporcionar una adecuada iluminación natural en el espacio, la reducción de la demanda eléctrica de iluminación y su impacto en la demanda pico de calefacción y refrigeración y su consumo energético [9] [320].

De sus resultados se desprende que *un WWR del 30% en la fachada Sur proporciona una iluminancia igual o mayor a 500 lux en el 76% del plano de trabajo* en el periodo de trabajo de la oficina. Al aumentar la superficie no se obtiene un incremento significativo de las condiciones de iluminación natural, por lo que *30% WWR se considera la región de saturación de iluminación* para este caso concreto. La situación es similar en la *fachada Oeste*, salvo que la región de saturación se sitúa en un *WWR del 40%* dando un *DAR* de 500 lux en el 70% del plano de trabajo.

La *fachada Este* recibe menos luz natural durante las horas de trabajo, por lo que la región de saturación se estabiliza en una relación de *superficies mayores del 50%*. Sin embargo, debido a la menor exposición directa de la *fachada Norte*, *una superficie menor del 20% siempre va a necesitar apoyo de iluminación artificial, estando su región de saturación por encima del 50%*, pero este valor entra en conflicto con los requisitos térmicos [320].

Combinando los tres criterios propuestos, los autores obtuvieron que *la relación de superficies del 30% satisface los requisitos de iluminación natural en balance con las cargas térmicas y el consumo de iluminación artificial*. Los resultados muestran que una superficie mayor de ventana sólo

provocaría mayores demandas energéticas de calefacción y refrigeración sin proporcionar unas mejoras significativas en las condiciones térmicas y visuales interiores [320].

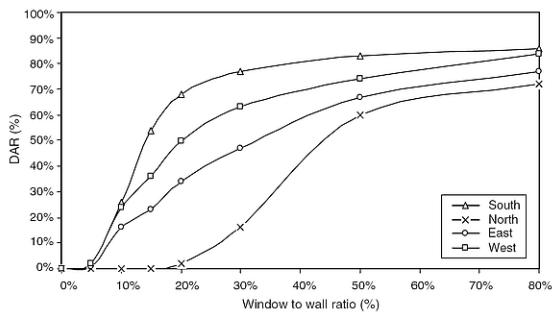


Figura 172: Impacto de la superficie de ventana sobre la Disponibilidad Relativa de Luz Natural según la orientación [320].

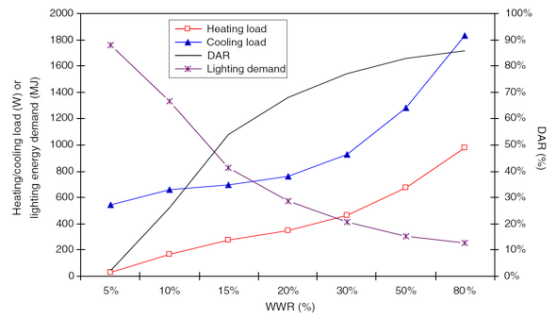


Figura 173: Impacto de la superficie de ventana en DAR, la demanda de iluminación y las cargas de calefacción y refrigeración para un espacio de oficina en Montreal orientado al Sur [320].

Las ventanas no sólo afectan a las condiciones objetivas de iluminación natural y al consumo energético del edificio, sino que implican otros factores más subjetivos como el deslumbramiento o el confort visual. Por ello, es habitual encontrar trabajos donde se estudian diferentes aspectos involucrados en la presencia de la ventana en un espacio.

En otro estudio similar *Shen y Tzempelikos* [278] los resultados señalan la superficie relativa del 30% como la óptima para las orientaciones Este, Oeste y Norte en Chicago.

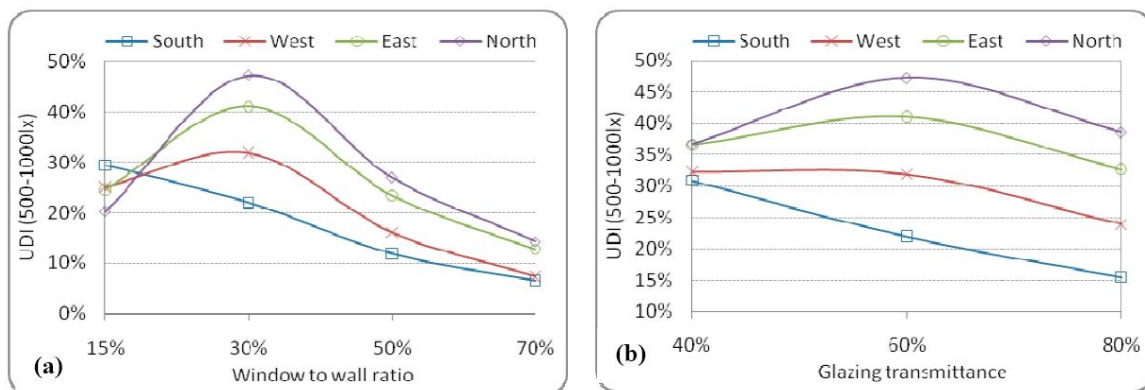


Figura 174: UDI(500-1000 lux) en función de la superficie relativa de ventana (transmitancia visible 60%) y la transmitancia visible del vidrio (30% superficie ventana-pared) para las cuatro principales orientaciones [278].

*Dubois y Flodberg* realizaron un análisis paramétrico utilizando la *CBDM* para determinar la superficie de ventana más adecuada en función de diferentes variables de diseño como la orientación, la reflectancia de las paredes interiores, la transparencia de los vidrios, el uso de protecciones solares, o la ubicación en diferentes localidades con una latitud entre 45° y 65° N [302]. Los resultados se expresan en términos de *Autonomía de Luz Natural (Daylight Autonomy - DA)* y de *Autonomía Continua de Luz Natural (Continuous Daylight Autonomy - DAcon)*.

De forma general, los resultados indican que, a pesar de las diferencias en las condiciones climáticas de las ciudades estudiadas (Malmö, Stockholm, Gotheburg, Östersund, Québec y Montreal), es posible conseguir una buena iluminación natural con una superficie relativa de ventana del 20% de la fachada Sur, 30% de las fachadas Este y Oeste y del 40% de la fachada Norte, dependiendo de la transparencia de los vidrios y de los coeficientes de reflexión de las paredes interiores, aunque estos valores sólo consideran los efectos sobre la iluminación natural y no sobre las cargas térmicas y las vistas del exterior [302]. Los beneficios de aumentar la superficie de ventana al 60% son marginales o inexistentes si se aumenta al 80%.



Ochoa *et al.* [309] proponen diferentes criterios para la selección del tamaño ideal de ventana de un espacio determinado, mediante simulaciones energéticas y *CBDM*. Estos criterios se basan en obtener un mínimo nivel de iluminación (500 lux durante el 50% de las horas de ocupación), un valor máximo de índice de deslumbramiento, una uniformidad de la iluminación mínima y un consumo energético mínimo. El criterio energético se basa en la relación entre la luz natural y la luz artificial, de forma que los autores definen como «región crítica» aquellos resultados en los que la luz natural no reduce el consumo de iluminación artificial.

De los resultados se desprende que, para Ámsterdam, el tamaño de ventana debe estar comprendido entre el *50% y el 70% WWR para las fachadas orientadas al Norte, entre 50-60% WWR para las fachadas orientadas al Este y Oeste y de aproximadamente del 60% WWR para las fachadas orientadas al Sur.*

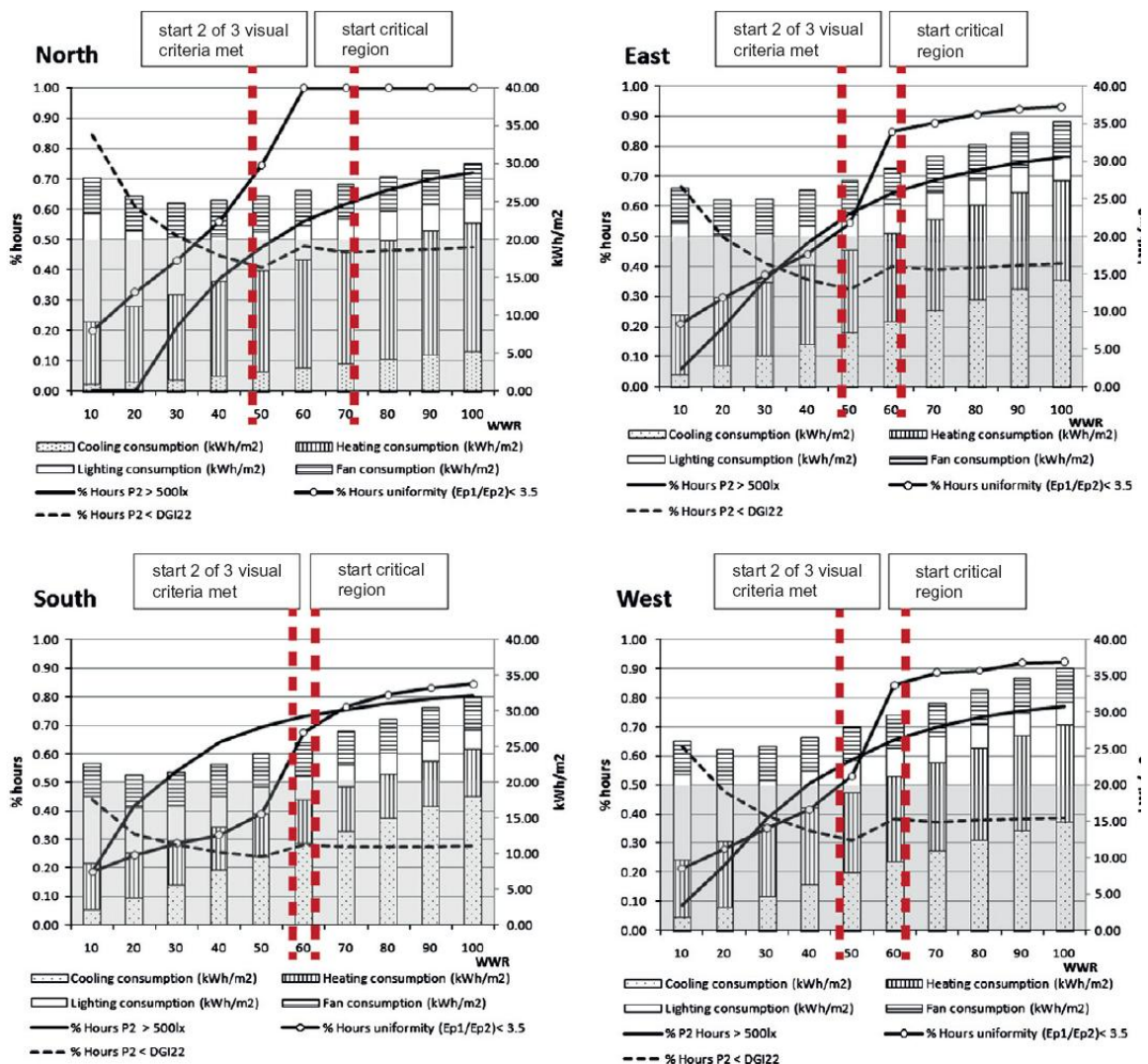


Figura 175: Tamaño de ventana que cumple con diferentes criterios energéticos y visuales para las principales orientaciones. Las líneas verticales indican los límites obtenidos a partir de los criterios propuestos. Las áreas sombreadas representan soluciones que no alcanzan los objetivos visuales [309].

En su estudio, Cammarano *et al.* [16] estudiaron el efecto de aumentar la *superficie relativa de la ventana respecto a la pared (WWR)* en términos de *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)* en habitaciones orientadas al Norte y al Sur (con presencia de persianas) localizadas en Turín.

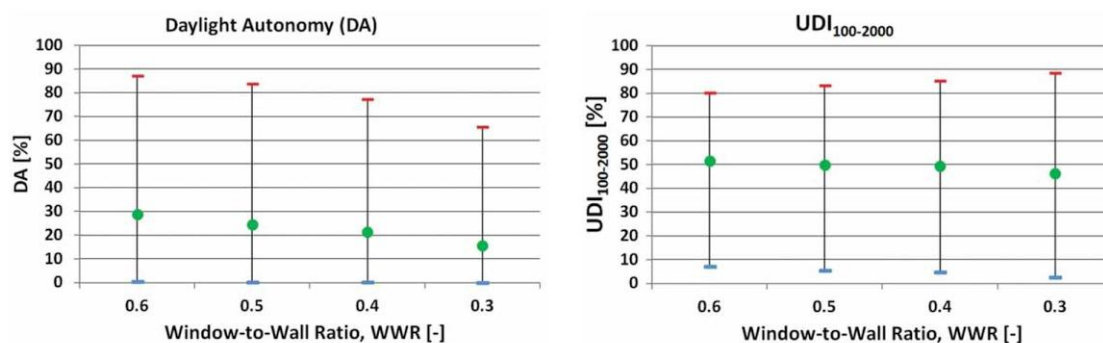


Figura 176: Efecto de la superficie de ventana en los valores de *DA* y *UDI* [16].

Sus resultados muestran cómo *se produce una reducción del valor de DA a medida que se reduce la superficie de ventana*, con una gran diferencia entre los valores máximo y mínimo. Los valores medios de *Iluminancia Natural Útil (UDI)* apenas sufren cambios, produciéndose una mayor variación con el menor valor de *UDI*.

### Transmitancia de los huecos

Actualmente existe en el mercado una gran cantidad de productos de ventana de altas prestaciones, tanto térmicas como ópticas [304]. Estos productos pueden considerarse activos si varían algunas de sus propiedades físicas automáticamente de acuerdo a algunos parámetros de control, como las ventanas electro-crómicas, o considerarse pasivos si no varían sus propiedades y requieren de la acción del usuario o de un elemento de regulación ajeno al producto [1].

A pesar de que el propósito principal de una ventana es admitir luz natural y crear un contacto visual entre el interior y el exterior, caracterizado por su *transmitancia visible ( $t_{vis}$ )*, la mayoría de los avances tecnológicos relacionados con los elementos que componen el sistema de la ventana, el conjunto formado por el acristalamiento y el marco, realmente van encaminados a conseguir sistemas con una baja *transmitancia térmica (U-value)* y un alto *Factor Solar ( $g_{\perp}$ )* o *Coefficiente de Ganancias Solares* para minimizar las pérdidas de calor por conducción y maximizar las ganancias por *radiación solar directa* en invierno [134].

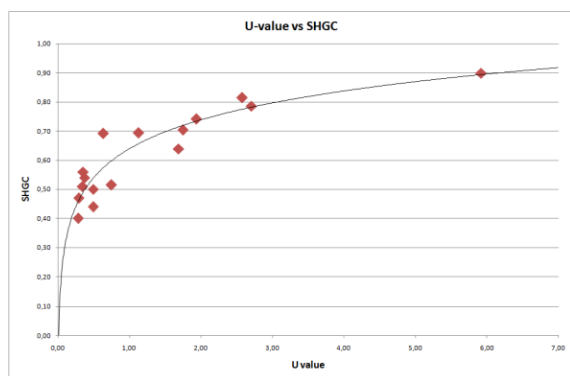


Figura 177: Relación entre la *transmitancia térmica* y el *Coefficiente de Ganancia Solar (SHGC)*, a partir de los datos de la Tabla 15

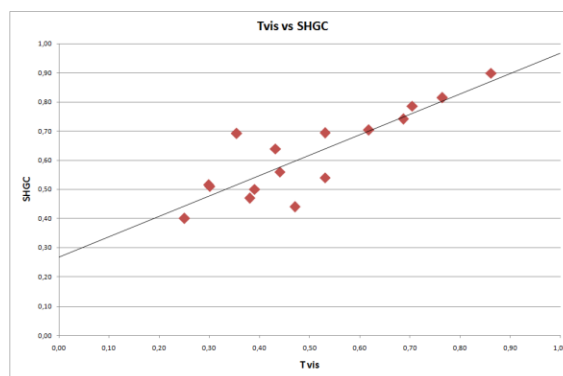


Figura 178: Relación entre el *Coefficiente de Ganancia Solar* y la *Transmitancia visible* a partir de los datos de la Tabla 15.

Sin embargo, la transmitancia primaria de energía solar, que refleja sólo la «transparencia» a la *radiación solar directa*, está muy relacionada con la *transmitancia visible*, por lo que en muchas ocasiones se escogen sistemas de ventana corrientes con una baja *transmitancia térmica*, por cuestiones normativas en muchos casos, que llevan aparejados un bajo *Coefficiente de Ganancia Solar* y una baja *transmitancia visible*, afectando, por tanto a la captación de radiación solar del espacio, tanto térmica como visible.

En este contexto, los acristalamientos al vacío, las nuevas soluciones y materiales para los espaciadores, las ventanas electrocrómicas, los acristalamientos fotovoltaicos y los acristalamientos de aerogel parecen tener actualmente el mayor potencial para mejorar su comportamiento térmico, solar y de iluminación natural [133] [304].

Sin embargo, la selección de un sistema de ventana es complicada cuando se considera simultáneamente la iluminación natural y el ahorro energético. Existen numerosos trabajos donde se verifican o cuantifican las especificaciones científicas de los sistemas de ventana en cuanto a su afición a la iluminación natural y el ahorro energético en los edificios, poniendo énfasis en optimizar los aspectos visuales y energéticos de dichos sistemas [302] [307] [309] [313] [321].

De hecho, varios estudios constatan que, al modificar las propiedades de los huecos, dependiendo del clima y de la orientación, se llega a un punto en el que se desequilibra el balance entre el ahorro de iluminación artificial y el consumo de refrigeración, obteniéndose finalmente un balance neto negativo [10] [313].

Respecto a la influencia sobre la demanda energética, los estudios centrados en el impacto de la variación de la *transmitancia térmica* muestran como tendencia general que *a medida que disminuye el valor de transmitancia térmica del hueco, se reduce el consumo anual de calefacción, produciéndose la mayor demanda de calefacción en los espacios cuya fachada acristalada se orienta al Norte ya que apenas reciben radiación solar directa. Los espacios orientados al Sur son los que tienen la menor demanda de calefacción, ya que reciben la mayor cantidad de radiación solar directa en invierno* [313].

También se concluye que el cambio de *transmitancia térmica* apenas afecta al consumo energético de refrigeración. En régimen de verano, las mayores demandas de refrigeración se producen en los espacios orientados al Oeste y la menor demanda en los espacios orientados al Sur [313].

Estas tendencias concuerdan aproximadamente con los resultados obtenidos por el *grupo de investigación TEP-130* en las simulaciones realizadas como parte del *proyecto Eficacia* [143] [322]. Las simulaciones realizadas muestran que la mejora de la *transmitancia térmica* del hueco, con su aparejada variación en el *Coefficiente de Ganancia Solar*, tiene un mayor impacto en la demanda de energía anual de la vivienda orientada al Oeste, pero es la vivienda orientada al Sureste la que tiene un balance anual menor, debido en parte a su muy reducida demanda energética de calefacción causada por su mayor admisión de radiación solar directa durante el invierno.

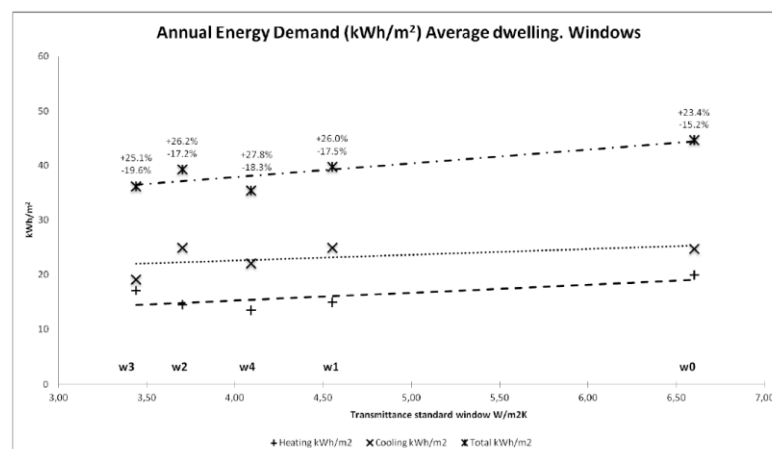


Figura 179: Rango de variación de la demanda de calefacción, refrigeración y total al modificar los huecos de las viviendas estudiadas agrupadas por orientación. *Proyecto Eficacia*. [322]

Tras el análisis de la incorporación de diferentes estrategias pasivas [322], los autores concluyen que las propiedades térmicas de las ventanas son las que producen las mayores mejoras en la reducción de demanda energética; además, el reemplazo de las ventanas tiene la ventaja de ser una actuación bastante abordable una vez que el edificio está construido. En este estudio, el cambio de ventanas producía una reducción de hasta el 15% de la demanda energética anual.

El trabajo de *Lee et al.* [312], investiga varios sistemas de ventana para determinar las características óptimas de las ventanas para cinco climas distintos de Asia. Aparte del tamaño y la orientación de la ventana, el estudio aborda la influencia de la *transmitancia térmica*, el *Coefficiente de Ganancia Solar* y la *transmitancia visible* sobre el ambiente visual y térmico en los cinco climas.

Los resultados muestran que generalmente *bajos valores de transmitancia térmica son más efectivos en la reducción de la demanda de calefacción que de refrigeración*. Respecto a la influencia del *Coefficiente de Ganancia Solar*, éste siempre es controvertido ya que lo ideal es tener un valor alto durante el invierno pero un valor bajo durante el verano, lo cual es especialmente relevante cuando existen grandes diferencias entre la demanda de calefacción y de refrigeración. También señalan la importancia de la transmitancia visible sobre el consumo de iluminación artificial, de forma que el consumo de iluminación disminuye logarítmicamente a medida que aumenta la apertura efectiva ( $\tau_{vis} \times$  superficie de ventana).

Respecto a su relación con el consumo de iluminación artificial, *Bodart y De Herde* [10] señalan que *a medida que se reduce la transparencia (transmitancia visible) del hueco aumenta el consumo energético de iluminación*; esta tendencia es prácticamente similar para cualquier orientación. Sin embargo esta tendencia no es lineal y que aunque pudiera pensarse que una alta *transmitancia visible* es positiva para reducir el consumo energético, *a partir de cierto valor este beneficio se reduce. Además, una alta transparencia permitiría una alta penetración solar por lo que nunca sería recomendable, por mucho que se redujera el consumo de iluminación artificial* [9].

Resultados similares obtiene *C. Reinhart* [277] [323]; al estudiar el ahorro energético de iluminación anual debido, entre otros a la utilización de un vidrio claro ( $\tau_{vis} = 75\%$ ) o un vidrio doble tintado en gris ( $\tau_{vis} = 35\%$ ), correspondiendo con los límites inferior y superior de las características de los vidrios en Norteamérica, obtiene que *el cambio de un vidrio de alta transmitancia a baja transmitancia visible provoca un 20% de ahorro*. Sin embargo, en este ahorro no se consideran las cargas térmicas asociadas, sólo la reducción del consumo de iluminación artificial [9].

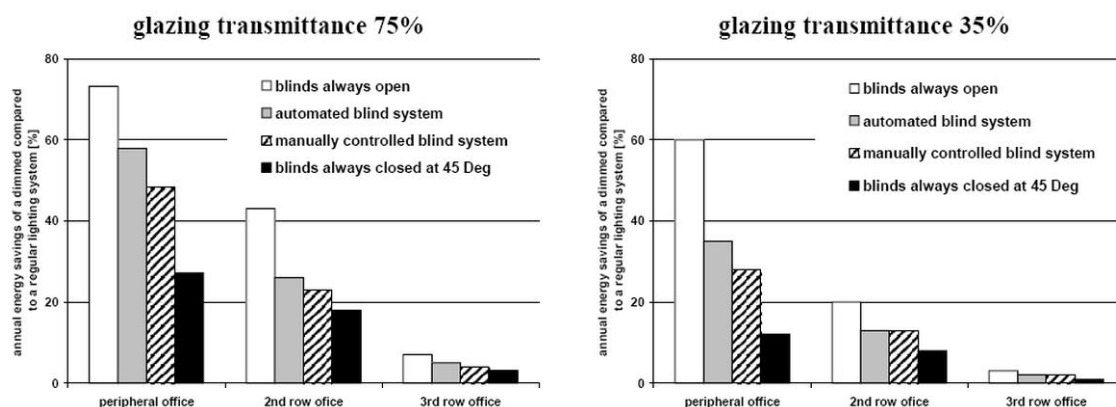


Figura 180: Ahorro energético debido a varios sistemas de regulación de las persianas y dos tipos de acristalamientos [277].

*Dubois y Flodberg* realizaron un análisis paramétrico utilizando la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)* para determinar la superficie de ventana más adecuada en función de diferentes variables de diseño como la transparencia de los vidrios [302].

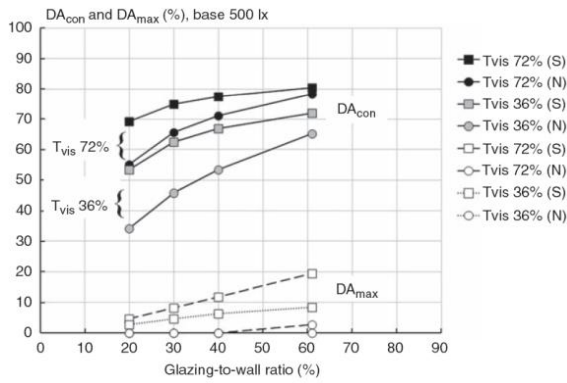


Figura 181: DAmax y DAcon para WWR y  $\tau_{vis}$  [302].

Las simulaciones con vidrios de baja transmitancia visible (36%) mostraron que se necesita una mayor superficie relativa de ventana (60%) para obtener los mismos resultados de *Autonomía de Luz Natural (DA)* que una menor superficie relativa de ventana (20%) con una relativamente pequeña diferencia en la reducción de riesgo de deslumbramiento por presencia de luz solar directa.

Por lo tanto, los autores señalan que *es preferible tener una menor superficie de ventana con una mayor transmitancia visible (72%) que una gran superficie acristalada con una menor transparencia*, ya que provocará menos pérdidas de calor durante el invierno por conducción y las condiciones de iluminación natural son aproximadamente equivalentes [302].

Shen y Tzempelikos [278] estudiaron el efecto de tres tipos diferentes de acristamiento con un *transmitancia visible* normal de 80%, 60% y 40%, en un espacio de oficina ubicado en diferentes localizaciones y con diferentes superficies de ventana utilizando *CBDM*.

Además de obtener los resultados en términos de *DA* para una iluminancia mínima de 500 lux, dividieron el rango de la Iluminancia Natural Útil combinada (UDI combined o UDI-c) -iluminancias entre 100 y 2000 lux- en tres grupos: 100-500 lux, 500-1000 lux y 1000-2000 lux para obtener una mayor información sobre los niveles de iluminación obtenidos en el plano de trabajo.

De los resultados se desprende que *para cualquier localización, la Autonomía de Luz Natural aumenta a medida que aumenta la superficie de la ventana y la transmitancia visible de la misma*. Los resultados relativos a la *Iluminancia Natural Útil* sin embargo muestran unas tendencias más complejas e interesantes.

Los resultados señalan que *la transmitancia visible del 50% como la más idónea para las orientaciones Este, Oeste y Norte*, manteniendo una superficie relativa del 30% [278].

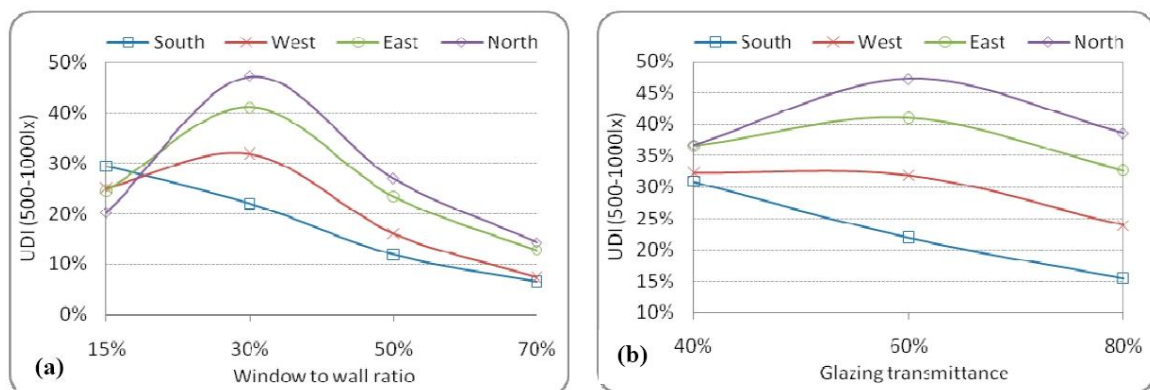


Figura 182: UDI(500-1000 lux) en función de la superficie relativa de ventana (transmitancia visible 60%) y la transmitancia visible del vidrio (30% superficie ventana-pared) para las cuatro principales orientaciones [278].

$UDI_{100-500}$  disminuye cuando aumenta el tamaño y la *transmitancia visible* de la ventana.  $UDI_{500-1000}$  alcanza su valor máximo para una  $\tau_{vis}$  60% con una superficie de 15% *WWR*, y para una  $\tau_{vis}$  80% para otros tamaños. Además, el valor de  $UDI_{500-1000}$  disminuye cuando aumenta el tamaño de la ventana y  $\tau_{vis}$  es del 80% o el 60%, pero es máximo para una superficie del 30% *WWR* con una

$\tau_{vis}$  del 40%. El tercer grupo de iluminancias de *UDI-c* muestra un comportamiento similar pero se pueden observar tendencias más complejas [278].

Location	New York			Chicago			Los Angeles			$\tau$	
	WWR	80%	60%	40%	80%	60%	40%	80%	60%		40%
DA (%)	15%	72.2	63.1	45	73.8	63.3	47.6	82.6	70.9	52.3	
	30%	89.2	84	73.6	91.7	86.8	76.2	95.3	92.9	85.1	
	50%	94.3	91.8	85.5	95.4	93.8	88.6	97.3	96.2	93.7	
	70%	96	94.3	90.2	96.4	95.4	92.6	98	97.2	95.6	
UDI (%) 100-500lx	15%	24.1	31.4	43.5	23	32.6	48.3	15.8	26.7	43.7	
	30%	8.9	13.6	22.9	6.6	11	30.4	4.5	6.5	13.4	
	50%	4.2	6.6	12.2	3.7	4.9	9.3	2.7	3.8	5.8	
	70%	2.7	4.2	7.9	2.9	3.7	5.8	2	2.8	4.3	
UDI (%) 500-1000lx	15%	24.6	26.8	24.9	28.8	29.4	25	30.3	30.9	27.6	
	30%	15.5	19.1	25.2	15.5	22	30.9	10.1	19.1	31.2	
	50%	8.8	12.9	18.5	6.8	11.9	20.8	3.6	6	16.4	
	70%	5.7	9	14.8	3.8	6.6	14.6	2.4	3.5	8.3	
UDI (%) 1000-2000lx	15%	24.9	21.6	14.9	25	20.6	12.6	27.6	24.4	16.7	
	30%	25.2	29.1	26.9	30.9	32.2	26.5	31.2	33.6	30.7	
	50%	18.5	22.9	29	20.8	27.8	33.2	16.4	27.6	35.5	
	70%	14.8	19.1	25.2	14.6	21.6	31.3	8.3	16.7	32.2	

Figura 183: Resultados obtenidos para las variables estudiadas [278].

### Forma, Posición y Distribución de los huecos

Los trabajos realizados sobre la influencia de los huecos en las diversas facetas a las que afecta se centran principalmente en el tamaño del hueco y en las propiedades físicas de los materiales que los constituyen [253]. De hecho, los estudios señalan a estos parámetros como los más determinantes de las condiciones cuantitativas de iluminación natural de los espacios [15] [318].

Sin embargo, la forma, la posición y la distribución de los huecos en los paramentos de un espacio también afectan al ambiente luminoso. Si bien la influencia de la forma es más cualitativa que cuantitativa, encontrándose principalmente estudios desde el ámbito subjetivo de la psicología, la posición y distribución de los huecos afectan tanto a la percepción del espacio como a la distribución de la luz natural en el espacio, siendo bastante más escasos los trabajos que se centren en estudiar su efecto sobre las condiciones de iluminación natural.

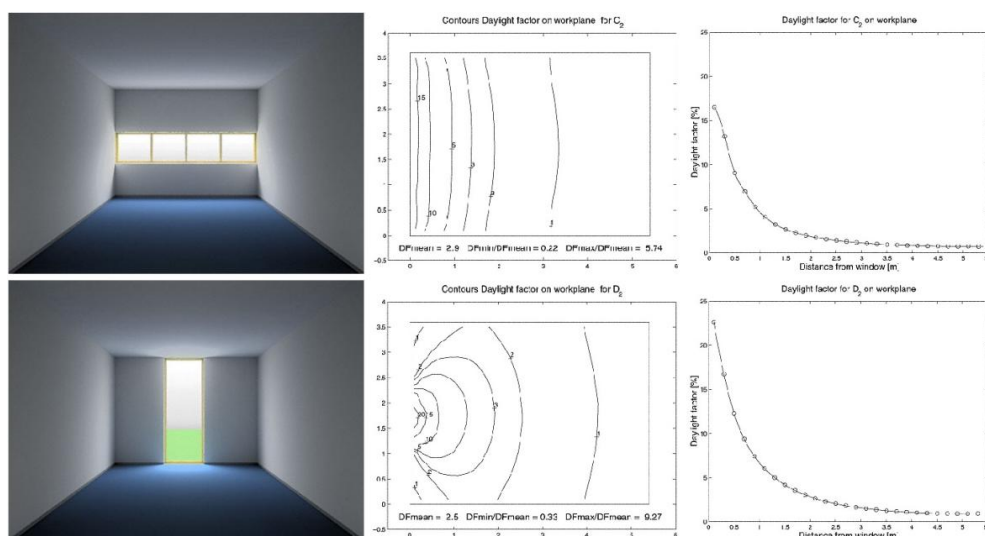


Figura 184: Distribución de curvas isolux bajo modelo de *Cielo Nublado Estándar CIE*. Ventana horizontal y ventana vertical [303].

Pese a que suelen ubicarse en base a la imagen global exterior del edificio, la localización, así como las características geométricas, de las ventanas y lucernarios, cuando se realiza un análisis de

las condiciones de iluminación natural, se estudia individualmente en función del espacio interior que están iluminando y se expresa generalmente en términos de posición respecto al plano de trabajo, que habitualmente se considera horizontal a aproximadamente 0'8 m del suelo.

Estudios basados en el *Factor de Iluminación Natural (DF)* y en la percepción del ambiente luminoso de los usuarios apuntan que [4] [95] [253]:

- Con las ventanas verticales (relación 2:1) la iluminación del interior se basa en bandas perpendiculares a la pared que la contiene, por lo que *produce grandes variaciones de la distribución de la luz a lo largo del día*.

Al tener una mayor altura *permite una mayor penetración de la luz en el espacio*, por lo que el techo y la parte superior de las paredes deben tener una alta reflectancia para contribuir a la distribución de la luz natural. Sin embargo, *al reducirse su anchura también se restringe la visión del exterior*, aumentando la sensación de enclaustramiento del espacio.

- Con las ventanas horizontales (relación 1:2) la iluminación del interior se basa en bandas paralelas a la pared que la contiene, *produciendo pequeñas diferencias en la distribución de la luz a lo largo del día*.

La forma de las ventanas horizontales puede corresponder con la *amplitud del campo visual* de los ocupantes, por lo que proporcionan sensación de amplitud del espacio.

Las ventanas horizontales *generalmente se perciben como menos brillantes* que las ventanas verticales de igual área y luminancia. Además, los ocupantes generalmente prefieren las ventanas horizontales cuando las tareas visuales se centran en objetos o actividades próximas al sujeto.

- Las ventanas localizadas en el techo distribuyen la luz sobre una mayor superficie horizontal que la iluminación lateral, por lo que *en aquellas localizaciones donde son más frecuentes los cielos nublados que los despejados, las ventanas en el techo o lucernarios son más efectivos que la iluminación lateral*.

Para una iluminación uniforme, *el espacio entre los lucernarios no debe ser mayor de la altura de la habitación para lucernarios pequeños, y dos veces la altura para grandes lucernarios*. En el caso de incorporar lucernarios, son las paredes y el suelo las fuentes secundarias de iluminación más importantes.

- Las *ventanas localizadas en una posición central con el alféizar a baja altura distribuyen más luz natural en el suelo y por lo que éste se convierte en la fuente secundaria de iluminación natural más importante*.
- *Los huecos que se sitúan en los extremos de las paredes pueden ayudar a los ocupantes entender el tamaño y la forma de los espacios* mediante la definición de las intersecciones de las mayores superficies. Sin embargo, restringen la visión del exterior, que permite obtener información sobre el paso del tiempo y las condiciones climáticas.
- Generalmente *la misma superficie de ventana, distribuida en varios elementos* o bien en una única ventana, *proporciona aproximadamente los mismos niveles de iluminación*. Sin embargo la división de dicha área en diversas partes *redunda en la distribución de la luz en el plano de trabajo, así como en la visión del entorno y la ventilación natural*.

La división de la superficie total de ventana en diferentes unidades *puede producir una mayor uniformidad de la luz*, si éstas se distribuyen en diferentes paramentos, se mejorará la ventilación natural del espacio.

El estudio de *B. Matusiak* [324] trata de encontrar cómo influye la forma de la ventana en la impresión del tamaño de un espacio. Tras realizar varias modificaciones, los resultados de las encuestas mostraron que *las ventanas verticales hacen que el espacio parezca más alto, y las horizontales que parezca más ancho*. Además, esta impresión también depende de la posición de la ventana, ya que *las ventanas adyacentes al techo, el suelo u otra pared hacen que ésta parezca más brillante*, por lo que parece que se encuentra más lejana al observador, variando la impresión de las dimensiones del espacio.

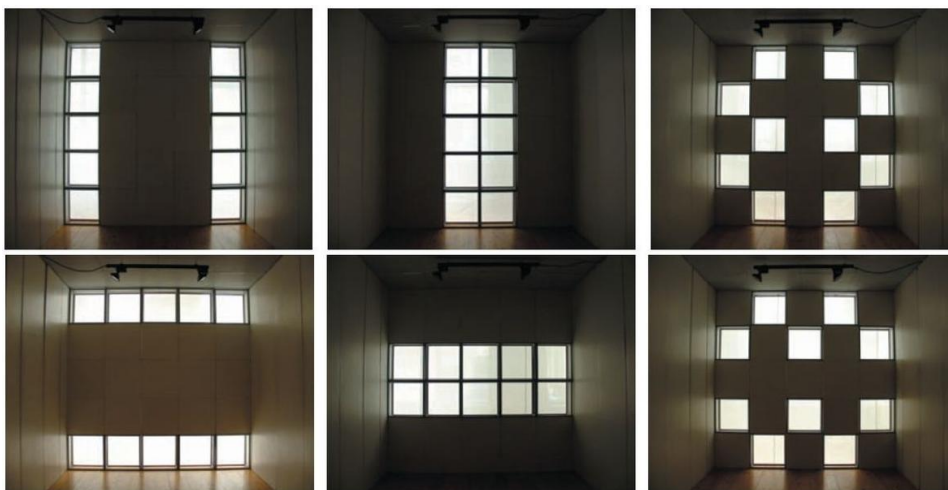


Figura 185: Variaciones en la forma y distribución de la misma superficie de ventana [324].

En su estudio sobre las preferencias de los trabajadores sobre la forma de la ventana, *Dogrusoy y Tureyen* [325] encontraron que *la mayoría de los usuarios prefieren los grandes ventanales, seguido de las ventanas horizontales y las ventanas de forma cuadrada* (relación 1:1). De hecho, aun teniendo la misma superficie, *los ocupantes prefieren las ventanas cuadradas que las rectangulares o las redondas, prefiriendo las ventanas horizontales a las ventanas verticales*.

En la revisión sobre las preferencias de los usuarios sobre el tipo de ventana realizada por *Galasiu y Veitch* [326], los autores señalan que en general *se prefieren grandes ventanales, con una altura entre 1'8 y 2'4 m, así como se prefieren las ventanas horizontales a las verticales, para obtener una mayor amplitud de visión del exterior*. En los trabajos que analizan se encuentra una gran disparidad de dimensiones de los huecos. En uno de ellos se mantuvo la superficie de la ventana y se modificaron sus proporciones obteniéndose que *la anchura óptima variaba entre 2'8 y 3'4 m, la altura del dintel óptima se situaba entre 1'8 y 2'4 m y la altura del alféizar óptima se encontraba entre 0'7 y 1'1 m*. Los sujetos encuestados también coincidían en su preferencia a las ventanas anchas (horizontales) frente a las ventanas más estrechas y de mayor altura (verticales).

Además, la proporción de la ventana está relacionada con las proporciones del espacio, de forma que si la fachada tiene una longitud menor que la mitad de la profundidad, los sujetos basaban su elección en la necesidad de obtener suficiente información del exterior. Si la longitud de la fachada se encontraba entre 0'5 y 1'2 veces la profundidad del espacio, la elección se basaba en la relación entre la anchura de la ventana y la longitud de la fachada. Sin embargo, en las fachadas con una longitud mayor a 1'2 veces la profundidad del espacio, no se incrementa el ancho de la ventana elegido. En este último caso, además, la división de la superficie de la ventana en varios elementos también era aceptable ya que no se perdía la visión global del exterior [326].

Por otro lado, apenas existe literatura que cuantifique cómo afecta la forma, posición y distribución de la superficie de huecos. Es cierto que los estudios donde se modifica la superficie de la ventana llevan implícitamente una modificación de las proporciones de la ventana en cuanto que



se agota una de las dos dimensiones de la pared que la contiene, así como una variación de la posición de la misma. De hecho, *a medida que aumenta la superficie de la ventana, su forma y posición pasan a un segundo plano* [318]. Entre los escasos trabajos, se encuentran los realizados por *Diepens* [303] o *Bokel* [314].

En su estudio, *Bokel* [314] muestra la relación entre la posición de la ventana y su forma, junto con la superficie de la ventana y la interacción de usuario con los elementos de protección solar, en el consumo energético de un espacio de oficina localizado en los Países Bajos. Combinando la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)* y la simulación energética, *Bokel* obtiene la demanda energética total y desglosada en iluminación, calefacción y refrigeración. De sus resultados se concluye que *cuando se considera sólo la posición de la ventana, ésta tiene un efecto significativo en la demanda de iluminación artificial*.

*Las ventanas localizadas en posiciones inferiores provocan una mayor demanda de iluminación artificial, aunque también reduce la demanda de calefacción del espacio*, especialmente para superficies de menor tamaño. Además de producir las mayores demandas de energía total, *no proporcionan una adecuada visión del exterior, por lo que no se recomienda su uso*. Pese a la buena literatura que tienen, el autor señala que *las ventanas localizadas en posiciones altas no presentan una influencia energética mucho mejor que las ventanas centradas en su paramento*, lo cual puede deberse a que la mayor ventaja de las ventanas altas es su mayor penetración de la luz natural, pero esto no se ve como una gran diferencia en la demanda energética respecto a la posición central [314].

El objetivo del proyecto '*Daylight Design Variations Book*' es mostrar el impacto de diferentes configuraciones de ventana sobre un espacio. Para ello, además de variar la superficie total de hueco, la forma, posición y distribución del mismo, se muestra la distribución del *Factor de Iluminación Natural* tanto en planta como en sección de cada modelo [303].

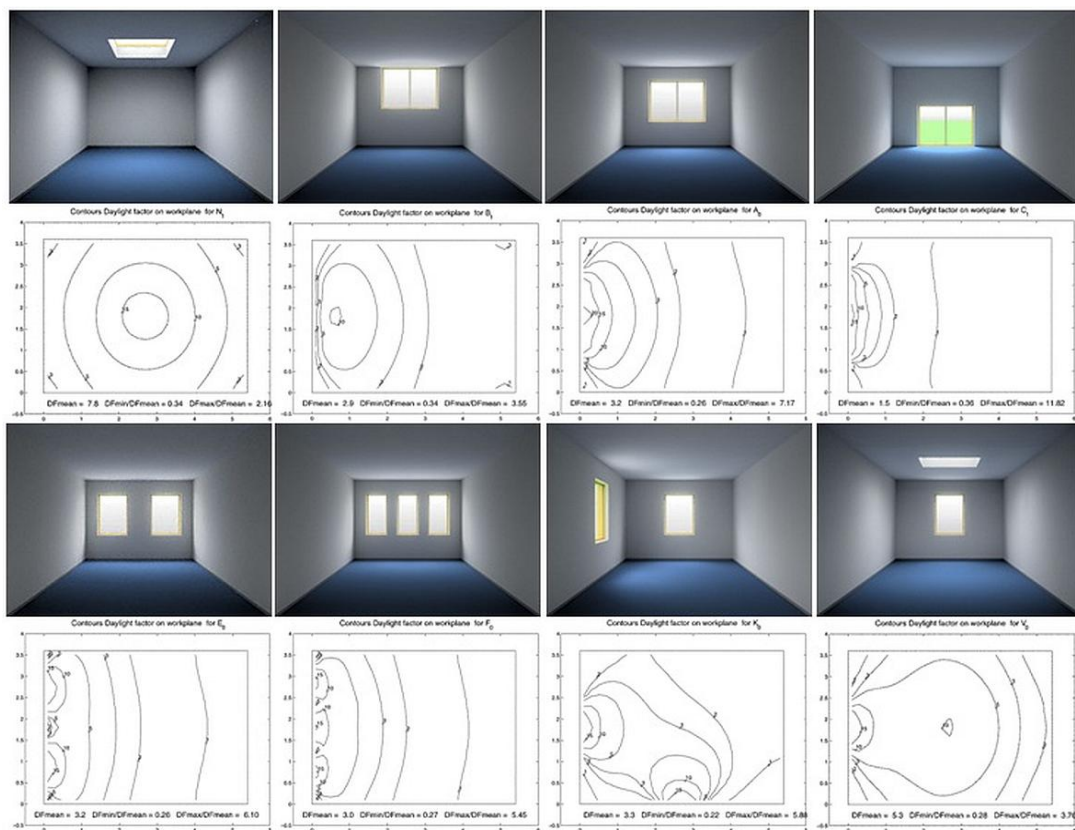


Figura 186: Algunas de las variaciones mostradas en '*Daylight Design Variations Book*' [303].

### 2.4.3.2 Elementos de control: las protecciones solares

La luz natural que entra en un espacio a través de sus huecos se compone, entre otros, de radiación solar en el rango visible del espectro electromagnético y de radiación solar en el rango infrarrojo. Una excesiva cantidad de iluminación natural directa en un espacio lleva aparejada, por tanto, una cierta cantidad de radiación térmica. Una excesiva iluminación natural provoca problemas de confort visual y de deslumbramiento a los usuarios; una excesiva ganancia de calor solar representa una de las fuentes más importantes de sobrecalentamiento de los espacios, especialmente en verano [10] [71] [305] [309] [320] [327] [328].

Estos problemas generalmente aparecen cuando se diseñan los espacios con grandes superficies de acristalamiento o inadecuadas para la orientación de la fachada que la contiene. A medida que aparecen estos problemas de disconfort lumínico y térmico se tiende a utilizar elementos de control, que reduzcan la entrada de *radiación solar directa*, y en muchos casos también la entrada de radiación solar difusa, en el espacio [9] [306] [317] [328].

Existen diferentes formas de controlar la entrada de la radiación solar, desde la modificación de la *transmitancia solar y visible* del sistema de ventana mediante la aplicación de films o películas de baja transmitancia [95], hasta la incorporación de elementos que bloquean parte de la *radiación solar directa* que incide sobre la ventana, conocidos generalmente como protecciones solares. Estos elementos previenen la aparición de condiciones de deslumbramiento proporcionando fundamentalmente una iluminación natural difusa, y reducen las *ganancias solares* [320] [329] [330].

Actualmente existe una gran variedad de tipos y formas de protecciones solares, pudiendo localizarse en el exterior, el interior o en las capas intermedias de la envolvente de los edificios, y pudiendo ser elementos fijos o dispositivos móviles [320] [331], controlados manualmente [332] o mediante un sistema de regulación y control [333] [334].

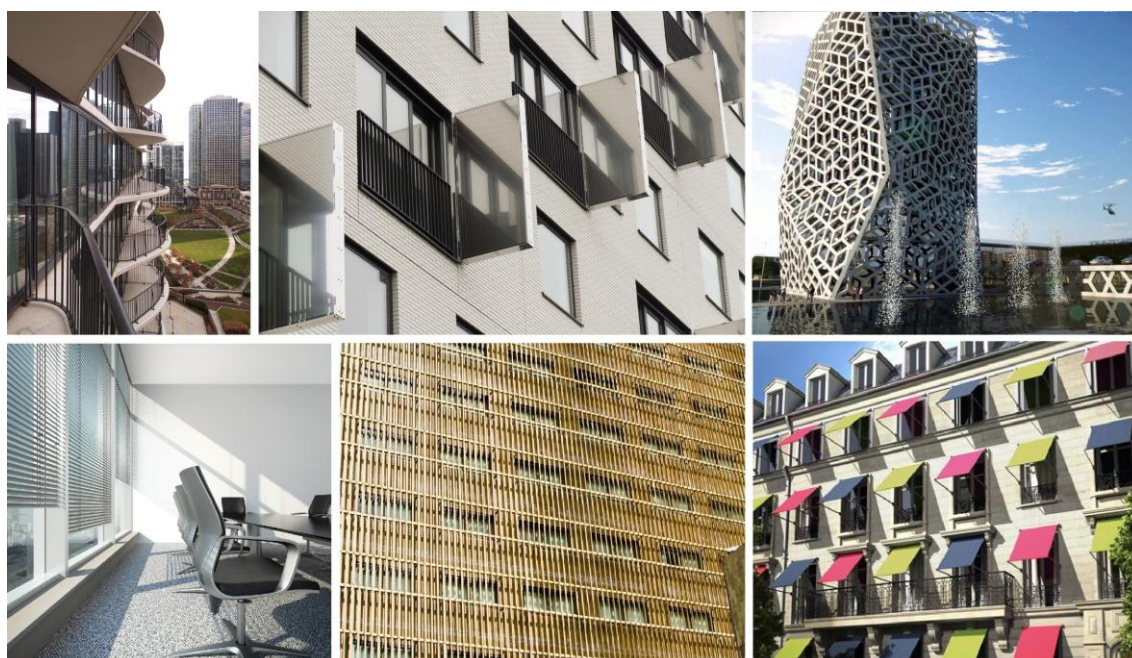


Figura 187: Protecciones solares fijas y móviles.

Ante el incremento de la demanda de refrigeración en los edificios, la revisión de la *'Directiva Europea de Eficiencia Energética de los Edificios'* [244] hace hincapié en aquellas estrategias que reduzcan dicha demanda, entre las que se encuentran los dispositivos de protección solar. Sin

embargo, no todos los elementos de protección solar reducen la carga térmica, como es el caso de aquellos dispositivos colocados en la cara interior de los huecos, ya que no bloquean la *exposición solar* de los huecos, admitiéndose ésta en el espacio a través de los mismos [95].

La ventaja de los dispositivos móviles es que se pueden ajustar a las condiciones exteriores, siendo más efectivos a la hora de controlar la entrada de la radiación solar difusa en el espacio [306] [329] [335], ya que los elementos fijos bloquean una parte determinada de la bóveda celeste mientras que el funcionamiento de los dispositivos móviles se basa en la variación de la porción de la bóveda celeste que bloquean. Debido a su amplia utilización, sobre todo en los espacios de oficina, los dispositivos de protección solar móviles ha sido objeto de numerosísimos estudios. Normalmente, estos trabajos suelen centrarse en cómo afectan a las condiciones de iluminación natural [9] [333] [336] [337], al consumo energético [320] [327] [335] [338] [339] y/o al confort y la percepción del entorno [328] [329] [333] [334] [340].

Además, desde la década de 1970, se han escrito numerosas publicaciones sobre la interacción de los trabajadores con el uso de los dispositivos móviles de protección solar, principalmente con las persianas venecianas [330] [332] [341], tratando de establecer un patrón universal que pudiera utilizarse en las *simulaciones energéticas* de los edificios, ya que la forma en que se utilizan estos dispositivos afecta tanto al ambiente térmico como al ambiente lumínico. Estos trabajos investigan si el uso de los dispositivos de protección solar dependen de factores como la orientación de la ventana, la hora del día, el tipo de cielo, la estación, la latitud o la posición del puesto de trabajo [9].

De la revisión de estos trabajos realizada por *Galasiu y Veitch* [326] se concluye que:

- Algunos estudios no encuentran relación entre las condiciones exteriores y el uso de los dispositivos de protección solar móviles.
- *Cuando entra luz solar directa, especialmente a más de 2 m de la fachada, se dispara el uso de los dispositivos de protección*
- *Niveles de radiación solar mayores de 250-300 W/m<sup>2</sup> normalmente inducen a un significativo porcentaje de uso de las persianas*
- *Con niveles de radiación solar menores de 50-60 W/m<sup>2</sup> los usuarios seguramente no utilizarán los dispositivos de protección*
- La mayoría de la gente utiliza los dispositivos de protección solar en base a su percepción del ambiente formado a partir de largos periodos de tiempo, más que en base a una reacción instantánea a las condiciones actuales.
- Una vez que estos dispositivos se cierran, bloqueando la radiación solar incidente, permanecen en dicha posición el resto del día

De hecho, varios autores señalan como un escenario común en el uso de los dispositivos de protección solar móviles, especialmente en edificios con grandes superficies de ventana, que éstos permanecen cerrados para controlar el deslumbramiento y se mantiene la iluminación artificial encendida [1] [10] [302].

Pese a los estudios realizados, las acciones de los usuarios siguen representando un alto grado de incertidumbre en la predicción del comportamiento energético de los edificios. Tal como señala *Reinhart* [277], *“uno de los principales errores en las predicciones del consumo energético de los edificios de oficinas reside en el tratamiento de los dispositivos de protección solar móviles”*. Normalmente se asume que las persianas permanecen retraídas durante todo el año,

proporcionando la máxima disponibilidad de luz natural posible, mientras que la iluminación artificial permanece encendida durante las horas de trabajo.



Figura 188: Incertidumbres introducidas por el usuario y los sistemas de regulación [342] [343].

En su trabajo sobre los espacios de oficina, los resultados de simulación revelaron que *la disponibilidad de luz natural en los espacios periféricos permitiría un ahorro energético de iluminación artificial entre el 25% y el 60% para un sistema de regulación con un funcionamiento ideal*. También observó que, cuando se utilizan sistemas de regulación, el ahorro energético en iluminación artificial depende de la estrategia de control de los dispositivos de protección solar móviles [277].

El desarrollo de los elementos de control y regulación ha incitado, además, diversos artículos cuyo objetivo era la determinación de un modelo predictivo de la apropiada posición de las lamas, o de la posición de las mismas controlada por los trabajadores [127] [330]. Aún así, los elementos de control suelen errar en la posición óptima de estos dispositivos cuando las condiciones exteriores varían en un corto periodo de tiempo [330].

Además de la incertidumbre que proporciona el usuario al operar manualmente los dispositivos de protección solar móviles o en su interacción con los sistemas de regulación, los patrones de ocupación de los espacios son sólo una normalización de una realidad altamente variable, de gran dispersión y dependiente de la actividad que se lleve a cabo en ese espacio. Estas son algunas razones por las que estos patrones no forman parte de las variables consideradas normalmente a la hora de determinar la forma de un edificio. Además, el uso del edificio puede cambiar con el tiempo [13], y con él, las actividades desarrolladas, la ocupación del mismo y los requisitos ambientales. Frente a la alta variabilidad que ofrece la presencia humana, los elementos fijos de la arquitectura deben proporcionar un acondicionamiento ambiental mínimo, delimitando el campo de acción de los usuarios y de las instalaciones del edificio.

Ello hace que los elementos de protección solar fijos sean un buen medio para reducir la entrada de radiación solar directa sin las incertidumbres provocadas por los usuarios y/o los sistemas de regulación y control, utilizando los conocimientos de geometría solar y las propiedades ópticas de los materiales [332] [344], a la vez que permiten la admisión de altos niveles de radiación solar difusa, normalmente redirigida a las zonas más alejadas de la fachada [345].

Al ser unos elementos fijos colocados en el exterior del hueco, son elementos muy determinantes de la imagen exterior del edificio, y también pueden interferir en la visión del exterior que tengan los ocupantes [328]. Los dispositivos más habituales de protección solar fija (voladizos, salientes, lamas y la combinación de estos elementos) se basan en el espesor o profundidad de los mismos para establecer un ángulo de obstrucción de la bóveda celeste, siendo el ángulo de visión del cielo su

complementario. Este ángulo de visión también puede establecerse mediante la separación de los elementos para un espesor fijo, como es el caso de las lamas [64] [346].

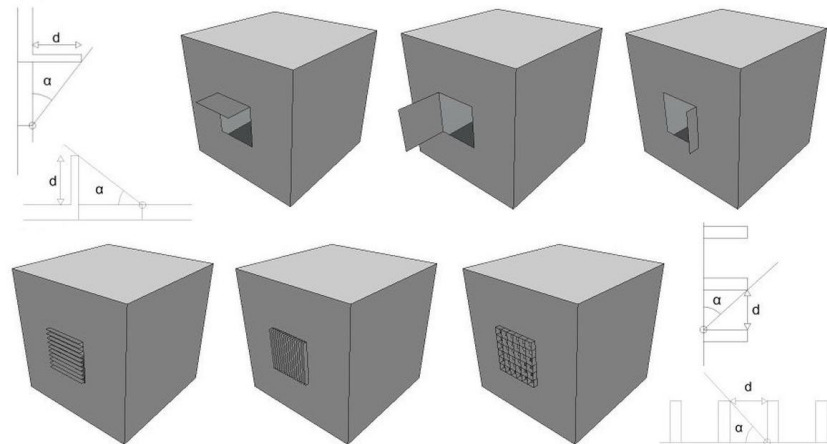


Figura 189: Características geométricas de voladizos, salientes laterales, lamas y brise-soleil [64].

Sin embargo, en la arquitectura actual, cada vez nos encontramos con más ejemplos de edificios con una doble envolvente cuya piel exterior, en principio con una geometría arbitraria y sin apenas espesor, marca la imagen exterior y generalmente homogénea del mismo. Esta piel exterior modifica de forma considerable las condiciones lumínicas y térmicas interiores en base a la superficie de ventana que obstruye, es decir, reduciendo el factor solar de los huecos, así como la superficie de ventana directamente expuesta a la luz solar directa, son lo que llamamos celosías [64] [342] [347].

Frente a la aplicación homogénea de los elementos de protección solar fijos, no debemos olvidar que cada fachada de un edificio requiere de un tratamiento diferente de protección ya que el sol incide con diferentes ángulos debido a la geometría solar [348].

Diversos estudios, como los realizados por *Bellia et al.* [327], *León et al.* [21], *Pamero-Marrero y Oliveira* [48] o *Datta* [71], entre otros, confirman que *cualquier elemento horizontal de protección solar aplicado en una fachada distinta a la Sur es menos efectivo a la hora de reducir las ganancias solares*, ya que debería ser excesivamente profundo para bloquear la radiación solar directa cuando el Sol se encuentra en posiciones más bajas [135] [306]. Por esta razón, si el emplazamiento lo permite, es preferible tener las mayores superficies de fachada con orientación Norte-Sur [327] [349] [350]. Si se utilizan voladizos, varios autores coinciden en que *la profundidad óptima de los voladizos debe ser aproximadamente igual a la altura de la ventana* [327] [340].

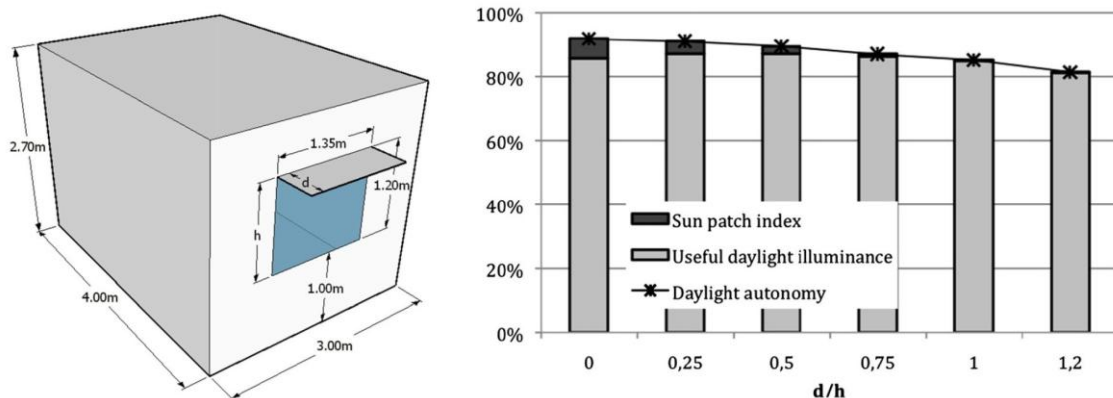


Figura 190: Resultados para diferentes voladizos [340].

Los resultados obtenidos por *León et al.* mostraron que *los voladizos tenían un gran impacto en las fachadas orientadas al Sur, pero apenas influían en las otras fachadas*, especialmente en la fachada orientada al Norte. Sin embargo, *las lamas horizontales provocaban severas reducciones en la demanda energética global en todas las orientaciones* salvo la Norte, siendo estas reducciones del 10% al aplicarlas en las fachadas al Este y del 14% en las fachadas al Oeste [21].

Incluso considerando los dispositivos de protección solar móviles, se observa en el trabajo de *Christoffersen et al.* [351] que *con las lamas en posición horizontal se obtienen las mejores condiciones de iluminación natural, ya que se reduce el contraste de luminancia*. También mostraron que, *para los estantes de luz (light shelves), la única situación en la que este dispositivo aumenta el nivel de iluminación es cuando éste refleja especularmente la luz solar directa* de forma que la mayor parte de la luz reflejada alcanza el techo. Sin embargo, *bajo condiciones de cielo nublado, los estantes de luz reducen el nivel de iluminación en el plano de trabajo ya que bloquean directamente parte de la visión de la bóveda celeste*.

Mientras en las fachadas orientadas al Sur, los elementos horizontales son los más efectivos a la hora de bloquear la radiación solar, *en las fachadas orientadas al Norte, Este y Oeste resultan más eficientes los salientes verticales*. En este sentido, *David et al.* [340] estudiaron el efecto de diferentes propuestas de voladizos y salientes laterales, obteniendo, por ejemplo, que los salientes laterales rectangulares reducen significativamente el nivel de luminancia de una habitación en comparación con aquellos de forma triangular. Sin embargo, *Wong y Li* [352] señalan que *la efectividad depende de su profundidad, de forma que a medida que ésta aumenta, se reduce la demanda de refrigeración de los espacios orientados al Este y Oeste*.

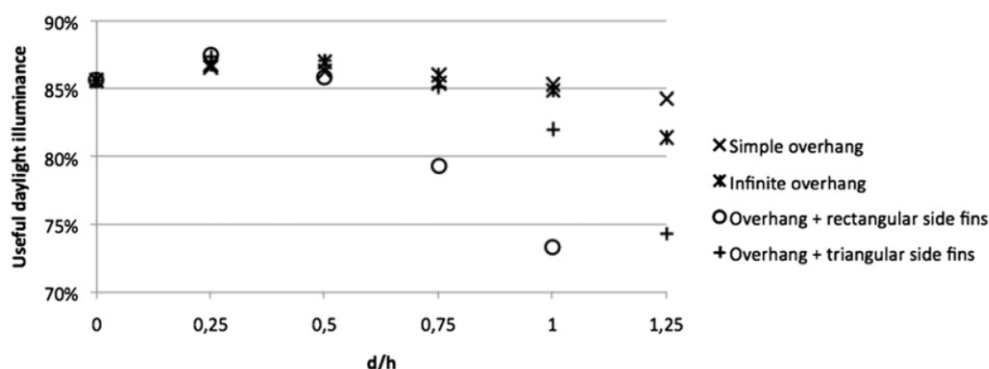


Figura 191: UDI100-2000 para diferentes propuestas de protección solar fija [340].

Otros autores como *Alzoubi* [353] también estudiaron el impacto de las lamas verticales y horizontales sobre las condiciones de iluminación, centrándose en el ahorro energético y en la calidad de la iluminación. Los resultados mostraron que, para el 21 de Junio al mediodía, las lamas verticales proporcionaban una buena iluminación natural al mismo tiempo que disminuían la demanda energética, de acuerdo con los requisitos establecidos por la *IESNA*.

Frente a la utilización de elementos simples, varios trabajos también demuestran que *la combinación de elementos horizontales y verticales resulta más eficaz que la utilización de geometrías más sencillas* [142]. *Al-Tamimi y Fadzil* [348] compararon las condiciones térmicas interiores obtenidas a partir de la incorporación de cuatro configuraciones de protección solar respecto a no tener ningún tipo de protección. Debido al impacto de los elementos de protección solar fijos en las condiciones térmicas, recomiendan *la combinación de elementos horizontales y verticales (brise-soleil o egg crate) como la solución que proporciona la mejor reducción de la temperatura del aire interior y de las horas en discomfort ya que evita la radiación solar de un mayor rango de posiciones solares durante el verano*.

*P.M. Esquivias et al.* [64] [119] estudiaron el efecto de la incorporación de protecciones solares fijas sobre las condiciones de iluminación natural mediante la obtención de los valores de *Autonomía de Luz Natural (DA)* e *Iluminancia Natural Útil (UDI)*, para un espacio de referencia localizado en Sevilla.

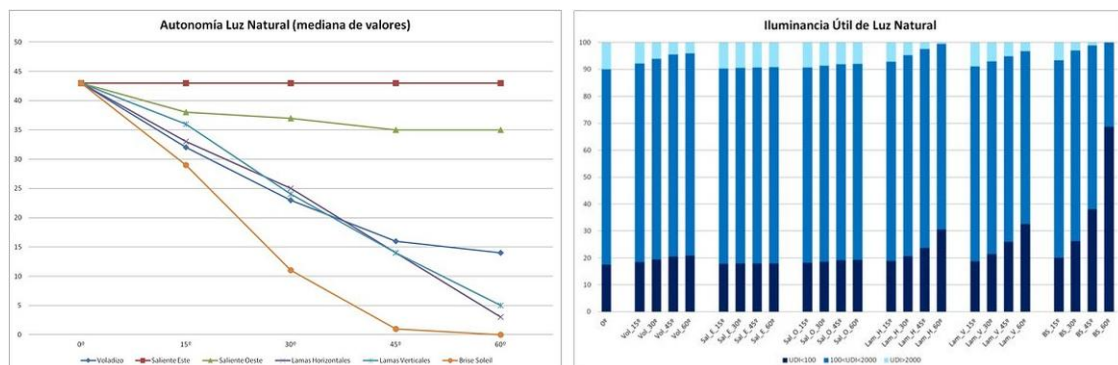


Figura 192: DA y UDI para voladizos, salientes laterales y lamas horizontales y verticales [64].

Los resultados muestran cómo *los salientes verticales apenas afectan a las condiciones de iluminación natural, sin embargo, las lamas verticales reducen drásticamente los valores de DA sin apenas influir en el rango útil de UDI*, por lo que se entiende que los niveles de iluminación en su gran mayoría se encuentran entre 100 y 500 lux. Aproximadamente la misma tendencia puede desprenderse de los resultados proporcionados por los elementos horizontales o la combinación de elementos verticales y horizontales.

Al expandir el estudio inicial [64], iluminado unilateralmente, a un espacio iluminado bilateralmente [119], los autores encontraron que se obtenían aproximadamente las mismas tendencias que con el modelo sencillo. En base a ambos trabajos, se puede decir que las protecciones solares menos efectivas son aquellas que se basan en elementos verticales, como los salientes laterales, especialmente si se instalan para proteger el hueco de la exposición solar del Este, al menos en Sevilla, ya que la exposición solar durante la tarde es mucho más intensa.

*La incorporación de elementos de protección solar fijos produce un incremento en el porcentaje del plano de trabajo en rango útil, entre 100 y 2000 lux, debido generalmente a la reducción de excesiva iluminancia.* Mientras los valores de UDI ofrecen mínimas variaciones, los resultados de DA muestran las mayores variaciones. En general, *a medida que aumenta la profundidad de los elementos, se reduce el porcentaje del plano de trabajo que consigue 500 lux durante el 50% del tiempo considerado mediante iluminación natural*, delatando aquellos ángulos de obstrucción en que dicha superficie es menor del 50% [119], requiriendo, por tanto, de la activación de la iluminación artificial.

Es decir, los elementos de protección solar fijos pueden reducir el incremento de las cargas térmicas mientras controlan la intensa luz natural del verano, mejorando el confort visual y reduciendo la probabilidad de deslumbramiento [332] [354]. Sin embargo, en invierno también pueden bloquear una significativa cantidad de radiación solar. Esta reducción de las ganancias solares disminuiría las cargas internas del espacio, aumentando la demanda de calefacción [329]. Además, si estos elementos representan una excesiva protección durante el invierno puede dar lugar a una reducción de iluminación natural tal que obligue a utilizar la iluminación artificial de forma continuada.

El diseño de las protecciones solares, por tanto, es un elemento clave para asegurar un efecto beneficioso sobre las condiciones ambientales interiores [328], por lo que también debe considerarse que mientras que el uso de los elementos horizontales es esencial en las fachadas

orientadas al Sur, especialmente en los climas mediterráneos [153], *sin embargo, en climas más fríos donde se requieran más ganancias solares en invierno, puede que no se necesiten elementos de protección solar* [327] [119].

*Büllo-Hübe* señala, no obstante, que, pese a que el adecuado diseño de las protecciones solares es fundamental, es difícil obtener una protección solar que proporcione beneficios siempre a lo largo del año [306]. Su trabajo muestra que probablemente no sea suficiente con evitar la penetración de la luz solar directa con las protecciones solares para evitar el deslumbramiento en los espacios.





## 2.5 Abstract of the State of the Art

---

The relationship between Architecture and Daylighting has varied considerably from one period in history to another. While daylight was the principal source of illumination, the need to light up the interiors of buildings inevitably led architects to observe and experiment with its effects, their main aim being to design buildings which would provide suitable lighting conditions for the activities to be performed in such spaces.

Although it may be impossible to pinpoint the exact moment when the relationship between Architecture and Daylighting was broken, their separation was undoubtedly due to many factors. Technological advances in the late 19<sup>th</sup> and early 20<sup>th</sup> centuries – the development and expansion of electric lighting, self-standing building envelope structures, the boom in the glass industry, the divergence of scientific knowledge from architectural design, etc. – led to the emergence of systems which made it possible to regulate ambient environments inside buildings, opening up a gap between architectural structures and the climate conditions outside [1].

Until then, the building envelope had been the means by which the environmental conditions outside were filtered and controlled to create specific ambient conditions in interiors. As a mirror of the ideas and attitudes of its day, Architecture used the technology available and exploited the knowledge and expertise handed down from earlier periods to articulate Man's relationship with his surroundings.

In this regard, lighting played an important role as a means of transmitting humanistic thought through architecture. Efforts at daylighting design were mainly limited to relatively important buildings associated with religious or political power [1], representative of the architectural style that prevailed in each period. Furthermore, architects usually only considered the aesthetic aspects of daylight, ignoring its functional potential [33].

The styles adopted not only served to convey a common idea: they also highlighted differences in the construction conditions inherent to specific sites, where the building solutions adopted demonstrated Architecture's symbiosis with local climate conditions. Such solutions – ground plan and orientation, doors and windows and, in short, the whole architectural definition of the building – put into practice all that inherited architectural expertise, rooted in the experience of past generations.

In domestic architecture, however, lighting was relegated to secondary importance in favour of health, ventilation and heating considerations. It was not until the 17<sup>th</sup> century, when glass became popular, that architects began to take daylight into account in households and work spaces [1].

Awareness of living conditions in residential spaces gradually increased, and at the end of the 19<sup>th</sup> century the first instruments began to be developed for measuring light levels and quantifying the amount of daylight entering spaces [21]. This may have been due to the introduction of the first easements of lights and views, above all in domestic architecture [48], which effectively heralded the birth of daylighting science.

## 2.5 Resumen del Estado del Arte

La relación entre la Arquitectura y la Luz Natural ha pasado por muy diferentes etapas a lo largo de la Historia. Evidentemente, mientras ha sido la principal fuente de iluminación, la necesidad de iluminar los espacios ha llevado a la observación y experimentación arquitectónica para, a través del propio diseño de los edificios, tratar de obtener unas condiciones de iluminación adecuadas para las actividades que tenían lugar en dichos espacios.

Quizás no pueda definirse exactamente a partir de qué momento se rompió la relación entre la Arquitectura y la Luz Natural, pero sí es cierto que existen muchos factores que contribuyeron en dicha ruptura. El desarrollo tecnológico que tuvo lugar a finales del siglo XIX y principios del XX supuso el desarrollo de sistemas que permitían controlar las condiciones ambientales en el interior de los edificios, abriendo una brecha entre la arquitectura y las condiciones climáticas exteriores [1]: el desarrollo y expansión de la iluminación eléctrica, la independencia estructural de la envolvente de los edificios, el desarrollo de la industria del vidrio, el distanciamiento entre el conocimiento científico y el diseño arquitectónico, la globalización de la Arquitectura, etc.

Hasta entonces, la envolvente era el medio con el que se filtraban y controlaban las condiciones medioambientales exteriores para conseguir unas ciertas condiciones ambientales en el interior de los espacios. La Arquitectura, como expresión del pensamiento de su época, utilizaba las tecnologías disponibles y recogía la sabiduría heredada de épocas anteriores, para expresar la relación del hombre con el entorno que le rodeaba.

En este sentido las condiciones de iluminación han jugado un papel relevante como medio de expresión de un pensamiento humanístico a través de la arquitectura. Estos esfuerzos por diseñar la iluminación natural se centraban fundamentalmente en edificios de cierta importancia asociados al poder religioso o político [1], representantes del estilo arquitectónico de cada época. Además, generalmente sólo consideraban los aspectos estéticos, que no funcionales, de la iluminación natural [33].

Estos estilos, además de transmitir una idea común, también muestran las diferencias constructivas inherentes a la localización del proyecto, mostrando la unión de la Arquitectura con sus condiciones climáticas locales, expresado a través de las soluciones constructivas del edificio. Estas soluciones, la forma y orientación del edificio, la apertura de los huecos, en pocas palabras, la definición arquitectónica del edificio lleva a la práctica todo ese conocimiento heredado de la buena praxis arquitectónica, obtenido a través de las experiencias de sus antecesores.

En la arquitectura doméstica, sin embargo, las condiciones de iluminación venían relegadas a un segundo plano a favor de las condiciones de salubridad, ventilación y en el control de las condiciones térmicas. No es hasta el siglo XVII, cuando se popularizó el vidrio, que la iluminación natural se comenzó a tener en cuenta en los espacios domésticos y de trabajo [1].

Tal es la consciencia sobre las condiciones de habitabilidad de los espacios residenciales que a finales del siglo XIX comenzaron a desarrollarse instrumentos de medida de los niveles de iluminación, así como medios que permitían evaluar la cantidad de iluminación natural en el interior del espacio [21], posiblemente promovido por la aparición de las primeras servidumbres de iluminación natural, especialmente en la arquitectura doméstica [48], dando lugar al nacimiento de la disciplina de la iluminación natural.

Meanwhile, the development of artificial lighting, heating and cooling systems reduced earlier constraints with regard to architectural form and the role of the building envelope as the principal element through which to control interior ambient conditions, albeit at the cost of an increase in energy dependence. [2]. The ever more widespread use and falling costs of artificial lighting, especially the fluorescent bulb at the end of the 1950s, relegated daylighting to a very secondary plane in architecture. Daylight was seen more as a problem to be solved, on account of its variability, rather than as an opportunity to add quality to interior spaces [2].

This tendency was reinforced by the emergence of a new concept of Architecture rooted in the Modernist movement, and one of its effects was to liberate building envelopes from their structural and ornamental implications. While some architects remained loyal to the historical principles of site orientation, natural ventilation and daylight, exploiting new building technology to that end, others used new technology as an end in itself, ignoring any relationship with the conditions outside a building [1][2].

This led, for example, to the widespread use of the curtain wall as an icon of the new Architecture. No importance was attached to the problems caused by using extensive glazed surfaces - glare, overheating of interiors, etc. - because the elimination of such problems by means of blinds or other shading devices meant that interior environments were determined no longer by a building's architecture but by its operational acclimatization systems. The bond between Architecture and Daylighting was broken.

The energy crisis of 1973 called into question the globalized model of energy-dependent, energy-thirsty architecture, a model which turned its back on local climate conditions. It was at this point that architects once again began to see daylight as a "free" source of energy [2][3] [21].

The relationship between Architecture and Daylighting became an energy issue. *Solar radiation* is a source of energy totally free of charge and free of CO<sub>2</sub> emissions, while insolation, or *solar gain*, helps reduce heating requirements (although it increases the need for cooling in interior spaces). Daylight is also a clean, free source of illumination, and therefore cuts down on lighting energy consumption.

The energy crisis motivated a flurry of research which resulted in a better understanding of the physical principles affecting ambient conditions inside buildings: units of measurement were defined and standardized, and metrics, models and procedures were developed with which to obtain them.

Advances in computer technology led to the creation of dedicated analysis software for monitoring energy consumption in buildings. These programs mainly focussed on reducing energy consumption attributable to acclimatization systems. At the same time, the rapidly evolving science of daylighting produced programs that allowed architects to "see" the quantitative results of their daylighting design decisions, usually expressed in terms of percentages [4] [51], on their computer screens.

Por otro lado, el desarrollo de sistemas de iluminación artificial y de sistemas de calefacción y refrigeración, permitieron una mayor independencia de la forma arquitectónica y de las características de la envolvente de los edificios como principal elemento de control de las condiciones ambientales interiores, a costa de una creciente dependencia energética [2]. La generalización y reducción de costes de la iluminación artificial, especialmente de la lámpara fluorescente a finales de los años 50, relegó la consideración de la luz natural en la arquitectura a un muy segundo plano, siendo más un problema a resolver por su variabilidad, que una oportunidad para dar calidad a los espacios interiores [2].

Este hecho se vio fomentado por el nacimiento de una nueva concepción de la Arquitectura, plasmada por el movimiento moderno, liberando la envolvente de los edificios de sus implicaciones estructurales y ornamentales. Mientras unos mantuvieron los principios históricos de la orientación del lugar, la ventilación natural y la iluminación natural utilizando la tecnología como un medio; otros utilizaron la nueva tecnología de la construcción como un fin en sí mismo, ignorando cualquier relación con las condiciones exteriores al edificio [1] [2].

Esto lleva, por ejemplo, a la expansión del muro cortina como imagen de la nueva Arquitectura sin importar los problemas derivados de la utilización de grandes superficies acristaladas como la aparición de situaciones de deslumbramiento y el sobrecalentamiento de los espacios ya que, eliminada la fuente de dichos problemas mediante el uso de persianas o cualquier dispositivo de protección solar, las condiciones ambientales interiores ya no dependen de la Arquitectura sino del funcionamiento de los sistemas de acondicionamiento activo. La ruptura entre la Arquitectura y la Luz Natural ya era un hecho.

Con la crisis energética de 1973 se pone en tela de juicio el modelo arquitectónico globalizado, energéticamente consumista y dependiente, que da la espalda a sus condiciones climáticas locales. En este momento se volvió a mirar a la luz natural, como fuente de energía «gratuita» [2] [3] [21].

La relación entre la Arquitectura y la Luz Natural se convierte en una cuestión energética: la *Radiación Solar* es una fuente gratuita y libre de emisiones de CO<sub>2</sub>. La Insolación, las *ganancias solares*, ayudan a reducir la demanda de calefacción aunque aumentan la demanda de refrigeración de los espacios interiores. Además, la Luz Natural es una fuente gratuita y limpia de iluminación, permitiendo, por tanto, reducir el consumo energético de iluminación.

La crisis energética como promotora de la investigación ha dado como resultado un mayor conocimiento sobre los fundamentos físicos que intervienen en las condiciones ambientales interiores: con este impulso se han definido y estandarizado las unidades de medida y se han desarrollado los indicadores, los modelos y métodos de cálculo para obtenerlos.

En este contexto se desarrollan las computadoras, lo cual derivó en la creación de programas de cálculo específicos para controlar el consumo energético en los edificios, enfocados principalmente en la reducción del consumo energético debido a los sistemas de climatización. También los avances en la disciplina de la iluminación natural dieron lugar a programas informáticos permitiendo a los arquitectos «ver» en el ordenador los resultados cuantitativos de sus decisiones de proyecto relacionadas con la iluminación natural, normalmente expresados en términos porcentuales [4] [51].

Towards the end of the 1990s, the relationship between Architecture and Daylighting began to change. The exploitation of daylight as an energy source was still the prime consideration, but more importance was now attached to illumination. Different scientific studies revealed how important daylight was for productivity and for people's moods and sense of wellbeing. The link between Architecture and Daylighting was now not only energy-based but also psychological [1] [50] [21] [220].

Good use of daylight depends partly on architectural design, which determines the amount of illumination interior spaces, and partly on the use of lighting systems or movable shading devices, especially those operated manually by users [9]. Inappropriate daylighting design can even lead to an increase in a building's energy consumption [115].

Architectural design should therefore strive to provide both good daylight and effective shading [1], in such a way as to reduce excessive solar gain, glare and heating/cooling requirements caused by excessive daylight [10]. The idea is to minimize users' needs to operate blinds or other shading devices or to switch on artificial lighting or air-conditioning systems and thereby reduce energy consumption in the building.

The need to ensure a minimum amount of daylight and sunlight led to the adoption of standards and guidelines rooted either in the field of urban planning – from the introduction, in the 19<sup>th</sup> century, of *easements of lights* in the United Kingdom [48] [64] to the morphological configuration of the city and its buildings [227] –or in general construction practice, where they mainly took the form of recommendations [71] [27] [119] for specific types of architecture (for example, museums, art galleries, education buildings, etc.) [124].

As scientists acquired a better understanding of how the human body reacts physiologically and psychologically to daylight and as the number of productive activities carried out in buildings multiplied, new standards and guidelines appeared, establishing broad minimal levels of lighting, value uniformity and glare ratios [231] and defining lighting designs capable of guaranteeing a certain level of visual comfort. These changes have also emphasised the huge extent to which daylighting and insolation influence human health.

Over the past twenty years, daylighting science has experienced many changes and discoveries. Firstly, it has seen the development of *sky models* which make it possible to calculate *daylight levels* at each point within a space in a new way and obtain hourly and sub-hourly values based on local climate conditions as recorded in standardised climate records. This new technique provides light measurements equivalent to those used to quantify and control heat transfer in buildings, and, as such, makes it possible to calculate heat and light performances in interior spaces with the same degree of resolution.

In the wake of such advances, new objective and subjective lighting metrics have been developed with which to plot changes over time in each sensor (time charts) or examine the distribution of values on the workplane (spatial charts) by defining criteria for evaluating the appropriacy of daylight conditions for visual tasks and for the visual comfort of a building's users.

Hacia finales de los años 90, la relación entre la Arquitectura y la Luz Natural empezó a cambiar, dándole una mayor importancia a la componente lumínica, aun prevaleciendo el *aprovechamiento de la luz natural* como fuente energética. Diversos estudios científicos demostraron la relevancia de la Luz Natural en la productividad, el estado de ánimo y, con ello, en el bienestar de las personas. Además de conservar una relación energética, la relación entre la Arquitectura y la Luz Natural se convirtió en una relación psicológica [1] [50] [21] [220].

El *aprovechamiento de la luz natural* depende, por un lado, del proyecto arquitectónico, que proporciona el acondicionamiento lumínico de los espacios interiores, y, por otro, de la utilización de los sistemas de iluminación o de los elementos de protección solar móvil, especialmente si están gestionados manualmente por los usuarios [9]: Un inadecuado diseño de las condiciones de iluminación natural puede incluso llevar a incrementar el consumo energético del edificio [115].

La Arquitectura, el diseño arquitectónico, debe proveer por tanto una buena iluminación natural como una protección solar efectiva [1], de forma que reduzca las ganancias solares excesivas, así como el deslumbramiento y las demandas de calefacción y refrigeración derivadas de una excesiva iluminación natural [10], minimizando la necesidad de los ocupantes de manejar las persianas y dispositivos de protección solar y encender la luz artificial y el sistema de climatización, reduciendo, por tanto, el consumo energético del edificio.

La necesidad de asegurar unas condiciones mínimas de iluminación y asoleo ha dado lugar a la adopción de normas y recomendaciones, ya sean desde el ámbito del urbanismo, desde la creación, en el siglo XIX, de *servidumbres de luz natural* en el Reino Unido [48] [64] a la configuración morfológica de la ciudad y sus edificios [227]; desde la edificación en general, principalmente a modo de recomendaciones [71] [27] [119] a usos específicos de la arquitectura, como la arquitectura de museos y galerías de arte o la arquitectura docente [124].

El mayor conocimiento de la respuesta fisiológica y psicológica del cuerpo humano a la luz natural y la multiplicación de las actividades productivas han dado lugar a estándares y recomendaciones sobre las condiciones generalmente mínimas de *niveles de iluminación*, de la uniformidad de los valores y del índice de deslumbramiento [231], que configuran un diseño de la iluminación capaz de asegurar un cierto confort visual. Así también ha resaltado la gran influencia de las condiciones de iluminación natural e insolación en la salud humana.

En estas dos últimas décadas se han producido muchos cambios y nuevos descubrimientos en la disciplina de la iluminación natural. Por un lado se han desarrollado nuevos *modelos de cielo* que han permitido la creación de una nueva técnica de cálculo de los *niveles de iluminación natural* en cada punto del espacio que permite la obtención de valores horarios o sub-horarios dependientes de las condiciones climáticas locales, recogidas en los archivos climáticos estandarizados. Con esta nueva técnica se obtiene la equivalente lumínica a las técnicas de transferencia de calor en los edificios. Por tanto ya se está en condiciones de calcular el comportamiento térmico y lumínico de los espacios interiores con la misma resolución.

En base a este avance se han desarrollado nuevos indicadores objetivos y subjetivos de iluminación que permiten expresar dicha evolución temporal en cada sensor (mapas temporales) o bien la distribución de valores en el plano de trabajo (mapas espaciales) en base a la definición de criterios que permitan analizar la adecuación de las condiciones de iluminación natural al desarrollo de las tareas visuales y al confort visual de los usuarios.

The new paradigm for assessing daylight is already being seen in the first legislative documents. In fact, we are now right in the middle of a transitional phase leading towards the full adoption of these new metrics, with a steady increase in the appearance of scientific studies based on this progress. At the moment, such studies coexist alongside others linked to the old forms of calculation, and it may be a few years before the transition is complete.

The recent discovery of new photoreceptors in the human eye has also provided more information about the link between daylight and human physiology, as expressed in the circadian rhythms that regulate the biological clock. The last few years have seen the development of calculation models that can be used to evaluate the non-visual effects of daylight, making daylighting design even more complex.

The variability and intensity of daylight represent further challenges which need to be studied in depth if its full potential for providing a healthy, comfortable interior environment is to be realised [9]. In this regard, the thermal impact also needs to be taken into account.

Growing pressure to save energy, embodied in the definition of zero energy buildings as an objective to be achieved in the near future, has led to a flood of energy demand and consumption requirements, further complicating the fulfilment of such objectives.

The objective now, therefore, seems to be to concentrate on achieving specific thermal conditions while consuming as little energy as possible, at the same time taking into account many other factors, including the energy related implications of daylighting, the performance of visual tasks, visual comfort, psychological wellbeing and physical health.

Ongoing research and the transformation of the knowledge acquired into increasingly more accurate calculation methods and algorithms has made it possible to calculate both daylight levels and heat transfer/interaction levels in a building on an hourly or sub-hourly basis [51]. Due to the complexity of the calculations needed to make predictions with any degree of precision, computer simulations have become a key tool for analysing interior ambient environments.

The increase in the use and integration of design software by architects is now reconciling Architectural Design with its impact on interior ambient conditions, although there is still a long way to go before full integration is achieved and the consequences of each and every design decision are understood in all their complexity.

The relationship between Architecture and Daylighting (i.e., solar radiation in the form of both heat and light) therefore seems to be changing. After long periods in which each of the two aspects was studied separately, we now find ourselves at the dawn of a fully inclusive relationship between Architecture and natural light in its entirety, a relationship which takes into account the many complex factors that affect human beings when they occupy an architectural space.



El cambio en el paradigma de cálculo de las condiciones de iluminación natural ya se está viendo reflejado en la aparición de los primeros documentos legislativos. De hecho, actualmente nos encontramos en pleno proceso de transición hacia la utilización de estos nuevos indicadores, de forma que poco a poco se están generando trabajos científicos basados en estos avances. Estos estudios coexisten con publicaciones relacionadas con los antiguos métodos de cálculo, y posiblemente pasarán todavía algunos años hasta que se complete dicha transición.

Además, el descubrimiento de nuevos fotorreceptores en el sistema visual ha desarrollado un mayor conocimiento sobre el vínculo entre la Luz Natural y la fisiología humana, expresado a través de la evolución de los ritmos circadianos, que regulan el reloj biológico. En los últimos años se han desarrollado modelos de cálculo a través de los cuales se puedan evaluar los efectos no visuales de la Luz Natural, añadiendo un factor más de complejidad al diseño de las condiciones de iluminación natural.

La variabilidad y la intensidad de la luz natural suponen la aparición de otros desafíos adicionales que necesitan ser estudiados cuidadosamente para explotar su potencial de proporcionar un ambiente interior saludable y confortable [9]. Para ello es necesario considerar también su efecto sobre el ambiente térmico.

La creciente presión energética, expresada a través de la definición de *los Edificios de Consumo de Energía Nulo* como objetivo a cumplir en un futuro cercano, ha recrudescido los requisitos energéticos de la demanda y el consumo energético de los edificios, haciendo también más complejo el cumplimiento de dichos objetivos.

El objetivo, por tanto, parece centrarse en obtener unas determinadas condiciones térmicas con el mínimo consumo energético posible considerando también otros muchos factores, incluyendo las condiciones de iluminación natural, por cuestiones energéticas, de desarrollo de tareas visuales, de confort visual, de bienestar psicológico y de salud física.

El continuo desarrollo del conocimiento plasmado en métodos y algoritmos de cálculo cada vez más precisos, ha permitido el cálculo de los niveles de iluminación natural de forma horaria o sub-horaria, así como el cálculo horario o sub-horario de las transferencias e interacciones térmicas en un edificio [51]. La complejidad de los cálculos necesarios para realizar predicciones con cierta precisión ha hecho de las simulaciones informáticas una herramienta fundamental para el análisis de las condiciones ambientales interiores.

La creciente utilización e integración de los programas informáticos de diseño por parte de los arquitectos está suponiendo una reconciliación entre el Diseño Arquitectónico y su impacto en las condiciones ambientales interiores, aunque todavía queda mucho camino por recorrer para su completa integración y entendimiento de las implicaciones de cada una de las decisiones de proyecto.

Parece, por tanto, que la relación entre la Arquitectura y la Luz Natural, entendida como radiación solar en su vertiente térmica y lumínica, está cambiando. Tras periodos donde cada faceta de la Luz Natural se estudiaba independientemente, nos encontramos a las puertas de una relación integral entre la Luz Natural, en todas sus vertientes, con la Arquitectura, considerando las múltiples y complejas repercusiones sobre el ser humano cuando habita un espacio arquitectónico.

The elements that influence daylighting and insolation are generally linked to a building's architectural form, so it is important either to have a good grasp of the role played by these parameters [16] or to use computer simulations during the design process [142] [150] in order to be able to make decisions about aspects that will later be difficult to modify [151] [152] [153]: in existing buildings, for example, the main elements that affect daylight conditions and the associated heat load are already defined, and, consequently, the scope for action is limited.

Most of the abovementioned architectural parameters or strategies are also decided in the early phases of design [16]. Some, like climate conditions, are imposed by the location; others, like the existence of elements in the surrounding area or the building's orientation, allow for a certain freedom of movement to be able to take full advantage of the site's potential; while yet others, like the detailed specifications for openings, are determined in the design project.

The need to control the amount of light entering a space, the distribution of that light to provide visual comfort and its relationship with the building's energy consumption have prompted a series of studies into how different architectural design strategies affect interior ambient environments, and led to the implementation or fine-tuning of different acclimatization systems.

The research work carried out can generally be categorised either as studies into how such strategies affect objective photometric parameters and the quality of the lighting (i.e., subjective analyses of daylight) or studies into how the incorporation and control of daylight relates to energy consumption. Up until relatively recently, these studies have been conducted using energy simulations of models created by specific lighting programs.

To reconcile Architecture with Daylight in a manner that addresses the full spectrum of the latter's constituent components, it is necessary to establish points of union between lighting theory and architectural practice.

There exists a huge variety of guidelines and recommendations for architectural and lighting design. Even though some degree of agreement is now being reached with regard to *lighting levels*, *sunlight hours* and *Daylight Factor values* thanks to the appearance of (not always obligatory) standards, design recommendations concerning the different parameters that affect daylighting and insolation in spaces are still extremely diverse.

The lighting criteria currently being agreed on at international level, a proposal based on different scientific studies, prescribe a target of 300 lux on 50% of the workplane for 50% of the annual time range considered [126][224]. It also establishes a maximum *sunlight hours* value of 1000 lux for 250 hours on more than 10% of the occupied surface. With regard to the *Daylight Factor* metric, and despite the existence of different national and environmentally certified regulatory recommendations, there seems to be a tendency to adopt the *Climate-Based Daylight Factor (DF<sub>cb</sub>)*. This way, the old metric can be linked to local climate conditions, thereby overcoming one of its biggest limitations.

Los elementos que afectan a las condiciones de iluminación natural e insolación, en general, van ligados a la forma arquitectónica, por lo que un adecuado conocimiento de la influencia de estos parámetros [16], o la incorporación de simulaciones informáticas durante el proceso de diseño [142] [150], va a permitir la toma de decisiones sobre aspectos que son difícilmente modificables a posteriori [151] [152] [153], como es el caso de los edificios existentes, donde los principales elementos que intervienen en la determinación de las condiciones de iluminación natural, y su carga térmica asociada, ya están definidos, reduciendo, por tanto el margen de intervención.

La mayoría de estos parámetros o estrategias arquitectónicas, además, se definen en las primeras fases del proyecto de Arquitectura [16]. Algunos de ellos vienen impuestos por la localización, como las condiciones climáticas; otros permiten cierta libertad de movimiento, como la presencia de los elementos del entorno y la orientación, para aprovechar la potencialidad del emplazamiento; y otros, como las características de los huecos, vienen definidos en el proyecto arquitectónico del edificio.

La necesidad de controlar la cantidad de luz que entra en un espacio, su distribución para proporcionar confort visual, y su relación con el consumo energético de los edificios, ha dado lugar a una serie de estudios sobre la incidencia de diversas estrategias de diseño arquitectónico en las condiciones ambientales interiores, así como la implementación de diversos sistemas de acondicionamiento o de regulación de los mismos.

Generalmente estos trabajos pueden clasificarse en estudios sobre la influencia de dichas estrategias sobre parámetros fotométricos objetivos, sobre la cualidad de la iluminación, es decir, análisis subjetivos de la iluminación natural, o bien en estudios sobre la relación entre la incorporación y regulación de la iluminación natural y el consumo energético, siendo, hasta hace relativamente poco, desarrollados mediante simulaciones energéticas de los modelos simulados con programas específicos de iluminación.

Para conseguir volver a unir la Arquitectura con la Luz Natural, en todo su espectro, es necesario establecer puntos de unión entre el conocimiento teórico de la Iluminación y la práctica arquitectónica.

Las recomendaciones de diseño arquitectónico y luminotécnico son muchas y muy variadas. Mientras actualmente se está llegando a un cierto consenso en cuanto a los *niveles de iluminación*, las *horas de soleamiento* y los valores de *Factor de Iluminación Natural*, derivado de la aparición de normativa, aunque de no obligado cumplimiento; las recomendaciones de diseño relativas a los diferentes parámetros que afectan a las condiciones de iluminación natural e insolación de los espacios presentan una gran diversidad.

Actualmente, el criterio luminotécnico que se está consensuando a nivel internacional, fundamentado por diferentes estudios científicos, enuncia como objetivo la obtención de 300 lux en el 50% del plano de trabajo para el 50% del rango temporal anual considerado [126] [224]. Así también se determina como límite máximo de las *horas de soleamiento* la obtención de 1000 lux durante 250 horas en más del 10% de la superficie ocupada. En cuanto al indicador *Factor de Iluminación Natural*, pese a las diferentes recomendaciones normativas nacionales y de certificación medioambiental, parece que existe una cierta tendencia a la obtención del *Factor de Iluminación Natural en base climática (DF<sub>cb</sub>)*, que permite conectar el antiguo indicador con las condiciones climáticas locales, salvando, por tanto, una de sus mayores limitaciones.

## **Size of Openings**

The parameters that have been studied in greatest depth, and the ones that have been addressed in the highest number of regulatory documents, are undoubtedly those pertaining to the size, or proportional size, of glazed surfaces in spaces and other window-related aspects.

Building regulations speak of relative surface areas of between 5% and 16% of the floor area and between 20% and 30% of the façade area. Scientific studies fine-tune the optimal relative surface of windows even further, although they tend only to consider one single location and it is therefore not possible to extract general recommendations.

Golden rules also propose design recommendations, this time based on experience. They tend to confirm certain intuitions: for example, the accepted wisdom that too small a surface increases contrast levels and raises energy consumption for artificial lighting whereas too large a surface reduces the definition of shadows, contrast and texture and increases the building's total energy consumption. Moreover, both of these extremes can cause glare.

Most of the studies reviewed focussed on higher latitudes, above 50°, where the proportion of glazed surface seems to range from 20% for south facing façades to 40% for north facing façades, the values for east and west facing façades being somewhere in between. But they also suggest that a proportion of between 50% and 70% is recommendable. At these latitudes, a proportion of 60% produces the same daylight conditions as a totally glazed façade (100%), so the remaining 40% will help diminish the thermal transmittance of the building enclosure – a crucial factor in cold climates.

At lower latitudes, in the Mediterranean region (30–40°), light saturation conditions vary from 30% glazed surface for south facing façades and 50% for north facing façades. In this situation, a proportion of 30% balances daylighting requirements with thermal loads and artificial lighting consumption.

If this same proportion is transposed to other latitudes, it can be adapted to accommodate local climate conditions by changing the specifications of the glazing employed, thanks to the intrinsic relationship that exists between the two parameters. Some studies actually suggest that it is preferable to have a lower window surface area with higher visible transmittance than a large glazed surface with less transparency.

The study of how glazing properties affect daylighting and insolation stems from the increasing appearance of new glazing products capable of altering the amount of light and heat admitted. It also seems to confirm the conventional wisdom which holds that the lesser the transparency, the greater the lighting energy consumption, and the lower the thermal transmittance, the lower the energy demand.

It should be pointed out that glazing is more effective in reducing the demand for heating than for cooling, as initially supposed. It is also true that a glazed opening's visible transmittance is limited in range, producing savings of up to 20% in a building's energy demand.

### **Sobre el tamaño de hueco**

El parámetro que sin lugar a duda ha sido el más estudiado y ha sido objeto de más documentos legislativos es el tamaño, o relación proporcional de tamaño, de la superficie acristalada de los espacios, así como otros parámetros relacionados con la ventana.

Los documentos legislativos aportan un rango de superficie relativa entre el 5% y el 16% respecto a la superficie del suelo, siendo entre el 20% y el 30% cuando se compara con la superficie de fachada. Los estudios científicos afinan más la superficie relativa de la ventana, pero suelen sólo considerar una única localización, por lo que no es posible extraer recomendaciones generalizadas.

Las reglas de oro también aportan ciertas recomendaciones de diseño asentadas con la experiencia, que vienen a confirmar ciertas intuiciones; como que una superficie demasiado pequeña aumenta el contraste y aumenta el consumo energético de iluminación artificial y una superficie demasiado grande reduce la definición de sombras, contraste y texturas, aumentando el consumo energético total del edificio. Ambos extremos, además, pueden proporcionar situaciones de deslumbramiento.

La mayoría de los estudios revisados se centran en localizaciones con latitudes altas, mayores de 50°, en las que el rango de proporción de superficie acristalada parece estar entre el 20% para las fachadas orientadas al Sur y el 40% en las fachadas orientadas al Norte, adoptando valores intermedios para las fachadas orientadas al Este y Oeste. Sin embargo también se indican como proporciones recomendadas un rango entre el 50% y el 70%. En estas latitudes, una proporción del 60% consigue las mismas condiciones de iluminación natural que una fachada completamente acristalada (100%), pudiendo, por tanto, aprovechar el 40% restante para disminuir la transmitancia térmica de los cerramientos, de vital importancia en los climas fríos.

En latitudes más bajas, en el entorno mediterráneo, (30-40°) el rango de saturación de las condiciones de iluminación oscila entre el 30% de superficie acristalada para la fachada Sur y el 50% para la fachada Norte. En este ámbito, la proporción del 30% satisface los requisitos de iluminación natural en balance con las cargas térmicas y el consumo de iluminación artificial.

Esta misma proporción trasladada a otras latitudes puede adecuarse a las condiciones climáticas mediante la modificación de las características del vidrio, debido a la relación intrínseca de ambos parámetros. De hecho, algunos estudios señalan que es preferible tener una menor superficie de ventana con una mayor transmitancia visible que una gran superficie acristalada con una menor transparencia.

El estudio del impacto de las características de los vidrios sobre las condiciones de iluminación natural e insolación está ligado a la creciente aparición de nuevos productos de ventana capaces de alterar la cantidad de luz y de calor que dejan pasar a su través. En este contexto se confirman las intuiciones establecidas, como que a menor transparencia mayor consumo energético de iluminación o que a menor transmitancia térmica menor demanda energética.

En este sentido cabe señalar que son más efectivos en la reducción de la demanda de calefacción que de refrigeración, tal como podría pensarse en una primera instancia. También es cierto que la acción de la transmitancia visible del vidrio tiene un rango limitado, proporcionando hasta un 20% de ahorro en la demanda energética de los edificios.

## **Position and Shape of Openings**

Since a larger window surface area provides a more uniform distribution of light, the position and shape of the opening are of only secondary importance. Certain experience-based recommendations also exist for windows with medium surface areas. These offer a qualitative view of daylight insofar that they have to do with the effect of the window's position and shape on daylight distribution and spatial perception.

Vertical windows produce great variations in light distribution during the course of the day, allowing more light to enter but reducing outward visibility.

However, horizontal windows transmit a greater sense of amplitude and skylights distribute light over a greater surface, increasing its uniformity, so these options are preferable in climates with lots of overcast days. Vertical windows make spaces look higher, whereas horizontal windows make them look wider.

With regard to position, the studies reviewed show that windows adjacent to surfaces make those surfaces look shinier and further away, altering the observer's perception of spatial dimensions. High up windows also allow in more light, removing blinding surfaces from the field of vision, although they offer no energy-related improvement over windows positioned in the middle of the wall. Windows with low sills distribute more light over the floor, increasing demand for artificial lighting. Furthermore, low windows are not considered recommendable because they do not provide satisfactory outward visibility.

It would appear that the ideal window head height is between 1.8 and 2.4 m and in any case not less than 1.25 m, while the width should be between 2.8 and 3.4 m. – or more or less proportional to the diagonal axis of the space in question, with a sill height of between 0.7 and 1.1 m, to ensure adequate outward visibility. However, the same window surface area, if divided up between different walls, provides approximately the same levels of illumination while also affecting light distribution, the view of the surroundings and natural ventilation.

## **Shading Devices**

Another factor that has been the subject of extensive scientific research is the presence and implications, in terms of both light and heat, of shading devices. It is generally corroborated that horizontal elements are the most effective, especially when placed on south facing facades. Overhangs, however, only have an impact on south facing facades, whereas fixed horizontal louvers affect facades facing in all directions except north. Fixed horizontal louvers also provide better daylight conditions because they reduce contrasts in luminance.

Vertical fins seem to be most effective on east and west facing facades, although their efficiency depends on their depth, vertical louvers providing a more effective solution. Nevertheless, combining horizontal and vertical elements has proven to be more efficient than using them separately. Trellises avoid solar radiation from the widest range of sun positions during the summer, thus impacting the building's energy demand.

### **Sobre la posición y la forma del hueco**

En lo relativo a la posición y la forma del hueco, como la mayor superficie de ventana proporciona una distribución más uniforme de la luz, la posición y forma de la ventana pasan a un segundo plano. En caso de superficies de ventana moderadas también existen ciertas recomendaciones provenientes de la experiencia que versan sobre el efecto en la distribución de la luz natural debido a la forma y posición de la ventana, así como sobre la percepción del espacio, aportando una visión cualitativa de la luz natural.

De esta forma, las ventanas verticales producen grandes variaciones en la distribución de la luz a lo largo del día pero permiten una mayor penetración de la luz aunque reduzcan la visión del exterior.

Sin embargo las ventanas horizontales dan una mayor sensación de amplitud y los lucernarios distribuyen la luz sobre una mayor superficie, aumentando su uniformidad, siendo preferibles en climas con abundantes días nublados. Las ventanas verticales hacen que el espacio parezca más alto y las horizontales más ancho.

En relación a su posición, los estudios demuestran que las ventanas adyacentes a las superficies hacen que ésta parezca más brillante, por lo que parece que se encuentra más lejos, variando la impresión de la dimensiones del espacio. Así también las ventanas altas permiten una mayor penetración de la luz, eliminando del campo visual la superficie deslumbradora, aunque no presentan una mejora en las condiciones energéticas que las ventanas centradas en su paramento; mientras tanto las ventanas con el alféizar a baja altura distribuyen más luz natural en el suelo, provocando una mayor demanda de iluminación artificial, no estado las ventanas bajas recomendadas por no proporcionar una adecuada visión del exterior.

Finalmente, parece que la altura de la ventana debe estar entre 1'8 y 2'4 m, en cualquier caso mayor de 1'25 m, y su anchura entre 2'8 y 3'4 m, o bien guardando una cierta proporción de la diagonal del espacio, con una altura de alféizar entre 0'7 y 1'1 m, en aras de asegurar una adecuada visión del exterior. Sin embargo, la misma superficie de ventana, distribuida en varios paramentos, proporciona aproximadamente los mismos niveles de iluminación, afectando a la distribución de la luz, la visión del entorno y la ventilación natural.

### **Sobre las protecciones solares**

Otro de los factores que es objeto de gran número de estudios científicos es la presencia de elementos de protección solar, ya sea por su implicación lumínica como térmica. En general se confirma que los elementos horizontales son los de mayor efectividad, especialmente ubicados en las fachadas orientadas al Sur. Sin embargo, los voladizos sólo tienen impacto en las fachadas orientadas al Sur mientras que las lamas horizontales producen modificaciones en todas las orientaciones salvo la Norte. Además, las lamas horizontales proporcionan mejores condiciones de iluminación natural porque reducen el contraste de luminancia.

Por otro lado los salientes verticales parecen ser más efectivos en las fachadas orientadas al Este y al Oeste, aunque su efectividad depende de su profundidad, siendo, además, más efectivas las lamas verticales. Sin embargo, la combinación de elementos horizontales y verticales resulta más eficaz que la utilización de los elementos por separado. Las celosías evitan la radiación solar de un mayor rango de posiciones solares durante el ventano, afectando, por tanto, a la demanda energética del edificio.

Despite so many recommendations, no consensus exists as to the optimal depths and distances between the different elements protecting openings from sunlight. Some studies have been carried out into the likelihood that movable shading devices will be used, based on the amount of sunlight or solar radiation entering a space. However, as sample-based experimental studies, these lack consensus regarding the approximate solar radiation value that will bring about a reduction in the amount of light and heat entering through the window.

The orientation of the façade with the glazed surface has been the object of numerous studies and recommendations rooted in professional practice, and it has been confirmed that south facing façades receive the largest amount of daylight, and that this is also the best orientation for ensuring heat gain in winter and controlling solar radiation in summer. This same orientation also provides the greatest Daylight Sufficiency, although it is the one most liable to cause glare for occupants.

North facing facades receive the least direct radiation and therefore offer more uniform lighting, although north-facing rooms consume more energy and have lower Daylight Sufficiency. East and west facing orientations make it more difficult to control daylight conditions because direct radiation is only received during the half of the day when the sun is at its lowest elevation.

### **Surrounding Conditions and Spatial Depth**

Obstructions in the areas surrounding buildings and spatial depth are factors that have traditionally been governed by different golden rules. The currently accepted norms are the *no-skyline* and *25° line rules*, which affect both factors by limiting a) the height and the distance of outside elements and b) spatial depth, defined as 1.5-2 times the window head height. However, research carried out into outside obstructions proposes 45° as the maximum angle at which reasonable daylighting can be achieved.

Many studies have been conducted into the nature of climate conditions, means of measuring and classifying climate data, the properties of different types of sky, the availability of natural light as expressed by different parameters, the data held in the different formats of standardized climate records, etc. Despite this, climate is the last factor to be taken into account in design recommendations, mainly because such recommendations are straitjacketed by the project location, which only on very rare occasions can be chosen from a number of different cities.

Daylighting studies encompassing different locations show how the results of different metrics are comparable in terms of performance, and it can therefore be argued that climate conditions clearly determine the *availability of natural light*, a role corroborated both by their very nature and by scientific research. Nevertheless, when the same architectural strategies are implemented for different locations, the results tend to be similar. The abovementioned studies, with their analysis of different climate conditions, clearly differentiate the places in which the prevalent strategies should ideally be based on diffuse illumination or direct daylight.



Pese a todas las recomendaciones, no existe consenso sobre cuál debería ser la profundidad o separación óptima de los diferentes elementos que proporcionan protección solar a los huecos. Cabe señalar que también existen estudios sobre la probabilidad de accionar los dispositivos de protección solar móviles en base a la penetración solar o la radiación solar recibida en el espacio, sin embargo, al ser estudios experimentales realizados por muestreo, no existe consenso sobre cuál es el valor aproximado de radiación solar que induce a la reducción de la cantidad de luz y de calor que entra por la ventana.

La orientación de la fachada con la superficie acristalada también ha sido objeto de numerosos estudios y recomendaciones heredadas de la práctica profesional, de forma que se confirma que la orientación Sur es la que mayor cantidad de luz natural puede captar, así como es la óptima para obtener ganancias térmicas en invierno y controlar la radiación solar durante el verano. Esta orientación es la que proporciona una mayor Suficiencia de Iluminación Natural, pero también es más susceptible de provocar deslumbramiento en los ocupantes.

Así también la orientación Norte es la que menor radiación directa recibe por lo que proporciona una iluminación más uniforme, aunque las estancias orientadas al Norte son las que tienen mayor consumo energético y menor Suficiencia de Iluminación Natural. Por otro lado las orientaciones intermedias dificultan el control de las condiciones de iluminación natural debido a que sólo reciben radiación directa durante la mitad del día cuando es menor la elevación solar.

### **Sobre las condiciones del entorno y la profundidad del espacio**

Respecto a los demás factores, las obstrucciones del entorno y la profundidad del espacio han sido tradicionalmente objeto de las diferentes reglas de oro, manteniéndose a día de hoy la *regla de la línea sin cielo* y la *regla de la línea de 25°*, afectando por igual a ambos factores, ya sea por la limitación de la distancia y altura de los elementos exteriores como la limitación de la profundidad del espacio, que está establecida en 1'5-2 veces la altura del dintel de la ventana. Sin embargo, los estudios realizados sobre las obstrucciones exteriores presentan el ángulo de 45° como límite máximo para obtener ciertas condiciones de iluminación natural.

Las condiciones climáticas han sido objeto de numerosísimos estudios sobre su naturaleza, los medios para medir y clasificar la información, sobre la cualidad de los diferentes tipos de cielo, sobre la disponibilidad de luz natural en función de diversos parámetros, sobre la información que contienen los diferentes formatos de los archivos climáticos estandarizados, etc. Sin embargo, es el último factor en cuanto a recomendaciones de diseño, debido principalmente a que éstas vienen sobrevenidas con la localización del proyecto, que raramente es susceptible de ser escogido entre varias ciudades.

Los estudios de iluminación natural que abarcan diferentes localizaciones muestran cómo los resultados de los diferentes indicadores mantenían el mismo comportamiento, por lo que se puede decir que, tanto por su naturaleza como por los estudios científicos, las condiciones climáticas se señalan como determinantes de la *disponibilidad de luz natural*. Sin embargo, las mismas estrategias arquitectónicas aplicadas bajo diferentes localizaciones producen resultados con tendencias similares. A través de estos estudios que abarcan varias condiciones climáticas se puede dilucidar en qué lugares deben prevalecer estrategias en base a la iluminación difusa o en base a iluminación natural directa.

To date, daylighting design recommendations and most scientific studies into the different circumstances and factors that influence daylight conditions - including its links with artificial lighting consumption - have been based on the use of the *Daylight Factor (DF)* as a natural light metric, on obtaining *light levels* for specific times in the year and on analysing *sunlight hours*. But one by one, new studies are now beginning to appear based on *Climate-Based Daylight Modelling (CBDM)*, where the results are expressed in terms of *Daylight Autonomy (DA)* or *Useful Daylight Illuminance (UDI)*.

Despite the gradual appearance of these studies, carried out using new techniques for observing how daylight varies from a climate-based perspective, further work still needs to be done to provide guidelines for designing and reinforcing, or recovering, the relationship between Architectural Design and Daylight. Moreover, we are now in a position to plot the evolution of light and heat condition with the same time resolution, so, to take the next step and make daylight an increasingly integral component of architectural design, it is necessary to start obtaining combined analyses of how interior ambient environments are affected by the solar radiation entering a space.

Hasta ahora, las recomendaciones de diseño sobre iluminación natural y la mayoría de los estudios científicos de diversas situaciones y variaciones de los diferentes factores que intervienen en las condiciones de iluminación natural, incluso su vinculación con el consumo de iluminación artificial, se basan en la utilización del *Factor de Iluminación Natural (DF)* como métrica de iluminación natural, la obtención del *nivel de iluminación* en momentos determinados del año o el análisis de las *horas de soleamiento*. Sin embargo, paulatinamente aparecen estudios en base a la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)* donde los resultados se expresan en términos de *Autonomía de Luz Natural (DA)* o *Iluminancia Natural Útil (UDI)*.

Aunque poco a poco van apareciendo estudios realizados con las nuevas técnicas donde se observa cómo varían las condiciones de iluminación natural en base climática, todavía es necesario completar el estudio para proporcionar algunas guías e indicaciones de diseño y fortalecer o recuperar la relación entre el Diseño Arquitectónico y la Iluminación Natural. Además, ya estamos en disposición de obtener la evolución de las condiciones térmicas y lumínicas con la misma resolución temporal, luego, para avanzar hacia una consideración cada vez más integral de la Luz Natural en el proyecto arquitectónico es necesario comenzar a obtener análisis combinados sobre cómo la *Radiación Solar* que entra en el espacio afecta a las condiciones ambientales interiores.



# METODOLOGÍA 3

### 3. Methodology

This chapter describes the methodology used in this piece of research. The methodology is based on the empirical-analytical method, a scientific research model rooted in experimentation and empirical logic.

It is a model which involves reproducing and studying a phenomenon under specific, laboratory-controlled conditions and introducing variables which may exert an influence on that phenomenon. In this system, independent variables are introduced into the process in a controlled manner and their effect on dependent variables is studied, thus revealing their impact on the study parameter.

The scientific method is based on the principles of reproducibility and falsifiability, terms which refer to a given experiment's capacity to be repeated anywhere, by anybody, and to the possibility that any scientific proposal can be refuted, or falsified. To this end, it is necessary to design and describe the experiment properly, indicating the resources and methods employed in its execution.

The first part of this chapter therefore focuses on the experiment's design, starting with the characteristics and properties of the reference model. The reference model was a simple geometric model which established a set of starting conditions to do with climate, the surrounding environment, orientation, glazed surface area and shading devices. The thermal and optical properties of the surfaces delimiting the geometric model were also fixed.

This reference model was defined taking into account not only daylight values proposed by current legislation, golden rules and other international institutions but also, since solar gain through openings was also one of the objects of the study, standard-specified thermal envelope requirements.

The study parameters are defined below. A list of architectural strategies that affect how global solar radiation enters spaces through windows or other opening and is distributed inside the building was first compiled from the State-of-the-Art. These strategies were placed in order of progression from the outside to the inside of the architectural space, starting with the solar radiation levels present at the project construction site (determined by local climate conditions) and moving inwards to the fixed shading systems.

To delimit the scope of the experiment, only those strategies or design decisions deemed to be of greatest relevance were selected as parameters for study. In the experiment, each parameter corresponded to a calculation series, constituting the independent variable for that series. For each variable, a set of values was established representing the full possible range of values, with each value corresponding to a specific calculation model within its series.

The second section describes the instrumental resources and software used to calculate daylight and solar gain in each calculation model. It explains how the computer programs most suitable for the experiment were chosen, taking into account their calculation methods and algorithms and their availability at the time the experiment was carried out. It also introduces the calculation concepts, or parameters, that had to be defined in order to perform the daylighting and energy simulations.

### 3. Metodología

En el presente capítulo se aborda la descripción de la metodología seguida para llevar a cabo esta investigación, que se basa en el método científico empírico-analítico. El método empírico-analítico es un modelo de investigación científica, que se basa en la experimentación y la lógica empírica.

Este método consiste en el estudio de un fenómeno, reproducido en las condiciones particulares y controladas de estudio, eliminando o introduciendo aquellas variables que puedan influir en él. Mediante este sistema, se introducen variables independientes en el proceso de forma controlada y se estudia su efecto sobre las variables dependientes de proceso, de forma que se mide el efecto sobre la característica que se estudia.

El método científico está basado en los principios de reproducibilidad y falsabilidad que consisten en la capacidad de repetir un determinado experimento en cualquier lugar y por cualquier persona, así como la posibilidad de que cualquier proposición científica sea refutada o falsada. Para que esto sea posible es necesario un adecuado diseño y descripción del experimento, indicando los medios y métodos empleados en la ejecución del experimento.

El primer apartado de este capítulo, por tanto, se centra en el diseño del experimento. En primer lugar se definen las características y propiedades del modelo de referencia. Éste consiste en un modelo geométrico sencillo en el que se determinan unas condiciones de partida relativas a las condiciones climáticas, a las condiciones del entorno, la orientación, la superficie acristalada y los sistemas de protección solar. Asimismo se fijan las propiedades térmicas y ópticas de las superficies que delimitan el modelo geométrico.

En la definición del modelo de referencia no sólo intervienen las determinaciones sobre iluminación natural propuestas por la legislación, las reglas de oro u otras instituciones internacionales, sino que, como también se considera la ganancia solar a través de los huecos, también se consideran los requisitos relativos a la envolvente térmica especificados en la normativa.

A continuación se aborda la definición de los parámetros de estudio. Del Estado del Arte se extrae una relación con las estrategias arquitectónicas que afectan a la entrada y distribución de la radiación solar global en un espacio a través de sus huecos o ventanas. Éstos se ordenan del exterior al interior del espacio arquitectónico, partiendo de la disponibilidad de radiación solar de la localización del proyecto, marcada por las condiciones climáticas locales, hasta los sistemas de protección solar.

Para acotar la extensión del experimento se seleccionan las estrategias o decisiones proyectuales que se consideran de mayor relevancia. Estos elementos escogidos constituyen los parámetros de estudio. Cada parámetro se corresponde con una serie de cálculo, siendo dicho parámetro la variable independiente de la serie. Por cada variable se establece un conjunto de valores que sean representativos de la amplitud de su rango de variación. Cada uno de los valores corresponde con un modelo de cálculo dentro de su serie.

En el segundo apartado se exponen los medios instrumentales, programas informáticos, que se han empleado para calcular la iluminancia natural y la ganancia solar en cada uno de los modelos de cálculo. Se aborda la elección de los programas informáticos más adecuados para la ejecución del experimento en función de los métodos y algoritmos de cálculo y la disponibilidad de los programas en el momento de la realización del experimento. También se introducen los conceptos o parámetros de cálculo que se deben definir para ejecutar las simulaciones de iluminación natural y las simulaciones energéticas.

Other, auxiliary, instrumental resources needed to create calculation models and process output data from the simulation software are then presented, together with the value adopted for each calculation parameter in each simulation program, and the output data from those programs is described.

The third section analyses the nature of the existing metrics and then goes on to describe the framework that was established to be able to define common calculation bases and the criteria adopted for processing the primary data obtained from the model simulations. As a result, new, intercomparable daylighting and insolation metrics could be defined capable of correlating the daylighting and insolation conditions in each calculation model.

The fourth section describes the procedures followed to obtain results, thus allowing the experiment to be repeated by personnel unrelated to this research project. Inherent to the results are the forms in which they are expressed. The formats established for expressing results affected the procedures with which research results were obtained in auxiliary programs.

This section first addresses how primary data from each calculation model was organized and systematized, and then examines the forms of expression most suitable for showing results - both those which describe daylighting and insolation levels and those used to analyse and evaluate them.

It then describes how the output data from each simulation model was processed to obtain climate-based daylight and insolation metrics that would provide simultaneous ambient light and heat information - both descriptive and analytical - for the space being studied.

Following this theoretical definition, and considering the large amount of information involved, the procedures are systematized to show the calculation routines (programming orders) created *ex-profeso* in this research project for the initial processing of the programs' output data to produce the descriptive results. Similarly, the practical procedure followed for the second phase of output data processing - the phase that provided the analytical results for the study - is also shown.

The last section focuses on the forms in which the results were expressed to facilitate their understanding. It covers both the descriptive and analytical results for each calculation model and the analytical results for each calculation series (study parameter) or group of series.



Asimismo también se expone la selección de otros medios instrumentales auxiliares, necesarios para la creación de los modelos de cálculo y para el tratamiento de la salida de datos de los programas de simulación. También se expone el valor adoptado para cada parámetro de cálculo de cada programa de simulación y se describen los datos de salida de los mismos.

En el tercer apartado, tras analizar la naturaleza de los indicadores existentes, se describe el marco establecido para fijar unas bases de cálculo comunes y los criterios adoptados para ser aplicados a los datos primarios obtenidos del proceso de simulación de los modelos. De esta forma se definen nuevos indicadores de iluminación natural e insolación susceptibles de ser comparados entre sí, capaces de correlacionar las condiciones de iluminación natural e insolación de cada modelo de cálculo.

En el cuarto apartado se describen los procedimientos seguidos para la obtención de resultados, de forma que el experimento pueda ser reproducido por cualquier persona ajena a esta investigación. Inherente a los resultados son los medios de expresión de los mismos. Fijados los formatos de expresión de resultados, éstos afectan a los procedimientos seguidos en los programas auxiliares para la obtención de los resultados de la investigación.

En primer lugar se aborda cómo se ha organizado la información primaria de cada modelo de cálculo, así como su sistematización. A continuación se analizan los medios de expresión idóneos para mostrar tanto los resultados que sirven para describir las condiciones de iluminación natural e insolación como los resultados que sirven para realizar el análisis de dichas condiciones y emitir juicios de valor de las mismas.

En tercer lugar se muestra el tratamiento de los datos de salida de cada programa de simulación para la obtención de indicadores en base climática de iluminación natural y de insolación que proporcionen información ambiental, térmica y lumínica, simultánea del espacio de estudio, tanto descriptiva como analítica.

Definidos los procedimientos de forma teórica, éstos se sistematizan considerando la gran cantidad de información que se maneja, por lo que se muestran las rutinas de cálculo (órdenes de programación) creadas ex-profeso, en el contexto de esta investigación, para el primer tratamiento de los datos de salida de los programas, que dan lugar a los resultados descriptivos. Del mismo modo, se muestran los procedimientos prácticos efectuados para el segundo tratamiento de los datos de salida de los programas, que dan lugar a los resultados analíticos de esta investigación.

Tras la descripción de los procesos llevados a cabo, el último apartado se centra en la descripción de los medios de expresión de los resultados, de forma que faciliten su comprensión, tanto de los resultados descriptivos y analíticos de cada modelo de cálculo, como de los resultados analíticos de cada serie (parámetro de estudio) o de cada grupo de series de cálculo.



### 3.1 Diseño del experimento

Los datos que permitan describir cómo afectan los condicionantes y las decisiones del proyecto arquitectónico sobre la cantidad de luz y calor que entra en un espacio a través de sus ventanas exteriores se obtienen en base a una investigación empírica siguiendo el método científico. Para ello se diseña un experimento donde se establecen las pruebas a realizar de manera que los datos generados puedan ser analizados estadísticamente para obtener conclusiones válidas y objetivas. Estas pruebas o experimentos son situaciones provocadas debido a la manipulación controlada y sistemática de una variable independiente para evaluar su influencia sobre los datos de salida.

Un adecuado diseño del experimento se basa en la elección de unas variables o parámetros de estudio que representen la problemática, en el control de los parámetros que pueden verse afectados por dichas variables y que afectan a los resultados, y en una planificación precisa para que se reduzca al mínimo cualquier variación dentro del experimento y permita su reproducibilidad y sistematización.

Los parámetros que afectan a las condiciones de iluminación natural y exposición solar, en general, van ligados a la forma arquitectónica. La mayoría de estos parámetros, además, se definen en las primeras fases del proyecto arquitectónico. Algunos de ellos vienen impuestos por la localización, como las condiciones climáticas; otros permiten cierto grado de libertad, como la presencia de los elementos del entorno y la orientación, para aprovechar la potencialidad del emplazamiento; y otros, como las características de los huecos, su distribución y los sistemas de protección solar, vienen definidos en el proyecto arquitectónico del edificio.

A partir de la observación de la realidad y de la revisión de la literatura sobre las condiciones de iluminación natural e insolación de los espacios interiores, se han seleccionado 12 de estos parámetros que se ordenan según la siguiente clasificación:

1. Condiciones climáticas
  - 1.1. Localización del proyecto
2. Emplazamiento
  - 2.1. Elementos presentes en el entorno del solar
  - 2.2. Orientación de cada uno de los planos verticales del proyecto
3. Proyecto arquitectónico
  - 3.1. Elementos de admisión de luz natural: los huecos exteriores
    - 3.1.1. Tamaño del hueco
    - 3.1.2. Transparencia del hueco
    - 3.1.3. Posición del hueco respecto a los paramentos interiores del espacio
    - 3.1.4. Forma del hueco
    - 3.1.5. División del hueco: presencia de varios huecos en el mismo paramento
    - 3.1.6. Distribución de los huecos: presencia de huecos en varios paramentos
  - 3.2. Elementos de control: las protecciones solares
    - 3.2.1. Voladizo
    - 3.2.2. Saliente lateral
    - 3.2.3. Dispositivos de lamas fijas

Para estudiar el efecto de cada parámetro y determinar el efecto de cada valor sobre las condiciones de iluminación natural e insolación se realiza un experimento en base a un *diseño de un factor (one factor at time design -OFAT)*, también conocido como *Análisis de Varianza Unidireccional (Analysis of Variance -ANOVA)*.

En el experimento, se estudian diferentes valores de cada parámetro de forma que se cubra un determinado rango de variación. La determinación de estos valores para ciertos parámetros, como la orientación o el coeficiente de reflexión, que tienen un rango de variación acotado, resultante de la selección de un número de valores dentro del rango que resulte representativo del mismo.

Sin embargo, para otros parámetros, como la localización del proyecto, es necesario realizar una investigación previa para finalmente escoger un número de valores que sea lo suficientemente representativo de la diversidad que presenta dicho parámetro, sin que suponga un número excesivo para el desarrollo del experimento.

En la Tabla 16 se muestra la clasificación de cada serie según su grado de libertad (condiciones climáticas, emplazamiento y proyecto arquitectónico) y su pertenencia a diferentes aspectos dentro del proyecto arquitectónico. En cada serie se expone la variable independiente escogida y el número de valores definidos.

Nº	Parámetro o serie de estudio	Variable independiente	Número de valores
<b>CONDICIONES CLIMÁTICAS</b>			
1	Condiciones climáticas	Localización	18
<b>POTENCIALIDAD DEL EMPLAZAMIENTO</b>			
2	Elementos del entorno	Ángulo de elevación de la obstrucción frontal	6
3	Orientación	Ángulo de orientación	16
<b>EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO</b>			
<b>ELEMENTOS DE ADMISIÓN DE LUZ NATURAL: LOS HUECOS EXTERIORES</b>			
4	Tamaño de hueco	Superficie de ventana/Superficie de fachada	11
5	Transparencia del hueco	Transmitancia visible	7
6	Posición del hueco	Posición del hueco en la fachada	9
7	Forma del hueco	Factor de forma del hueco	15
8	División del hueco	División de la superficie (nº filas x nº columnas)	13
9	Distribución de los huecos	División de la superficie y distribución fachadas	8
<b>ELEMENTOS DE CONTROL: LAS PROTECCIONES SOLARES</b>			
10	Voladizo	Ángulo de obstrucción	5
11	Saliente lateral	Ángulo de obstrucción	9
12	Dispositivos de lamas fijas	Ángulo de obstrucción	13
<b>TOTAL</b>			<b>130 (118+ref)</b>

Tabla 16: Resumen de parámetros, variables independientes y valores de estudio.

El modelo de referencia o de control está presente en cada una de las series por lo que aunque se definen 130 modelos de cálculo, al repetirse el modelo de referencia, sólo se realizan 119 modelos de cálculo diferentes (118 + referencia).

El efecto de cada parámetro sobre las condiciones de iluminación natural e insolación se define como la diferencia entre la media de todos los datos individuales obtenidos cuando el parámetro se encuentra en su mayor configuración y la media de todos los datos obtenidos cuando el parámetro se encuentra en su menor configuración.

### 3.1.1 El modelo de referencia

Una adecuada definición del modelo de referencia es relevante en cuanto que afecta al tipo y a la precisión de la obtención de los resultados. En dicho modelo se fijan los parámetros que permanecerán constantes a lo largo de todos los casos estudiados, así como se determinan los valores de partida de cada uno de los parámetros que se van a estudiar. El modelo de referencia que se utiliza en esta tesis, debido a las características del estudio, viene definido por sus características geométricas, ópticas y térmicas.

Si bien el modelo de referencia tiene unas medidas geométricas concretas, en el campo de la iluminación natural, debido a la analogía geométrica, es interesante expresar dichas dimensiones según valores relativos entre las diversas dimensiones, de forma que las dimensiones del suelo se expresan como un coeficiente de forma o la superficie acristalada como el ratio que le corresponde a la superficie de suelo o de fachada.

Geoméricamente [Figura 193], el modelo de referencia es un espacio de 3 m de altura, 3 m de anchura y 3 m de profundidad, de forma que las tres dimensiones tienen el mismo valor, por lo que el *coeficiente de forma* del suelo, techo y de las diferentes paredes es de 1; es decir, todos los elementos superficiales son cuadrados.

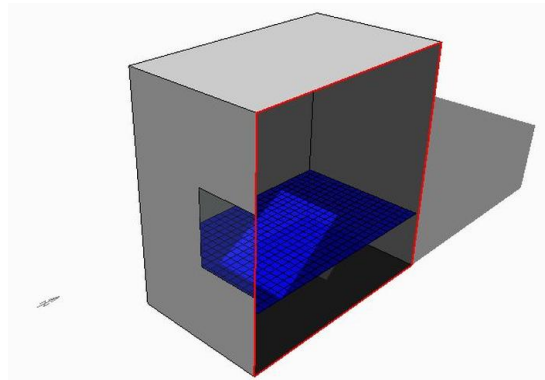


Figura 193: Definición geométrica del modelo de referencia en *Ecotect*. P.M. Esquivias.

A la hora de nombrar y diferenciar las diferentes paredes, se consideran las siguientes: fachada, pared opuesta a la fachada, perpendicular derecha y perpendicular izquierda, viendo el modelo desde el exterior de la fachada. Además de las dimensiones en valor absoluto del modelo de referencia, se proporcionan las relaciones dimensionales que guardan, expresados como *coeficientes de forma*. Los coeficientes de reflexión de partida de las superficies, así como las relaciones dimensionales del modelo, se muestran también en la Tabla 17:

Condiciones espaciales			
Anchura a (m)	3.00	Sup. Suelo y techo (m <sup>2</sup> ) [a*p]	9.00
Profundidad p (m)	3.00	Sup. Fachada y Opuesta (m <sup>2</sup> ) [a*h]	9.00
Altura h (m)	3.00	Sup. Paredes perpend.(m <sup>2</sup> ) [p*h]	9.00
Volumen (m <sup>3</sup> )	27.00	Sup. Envolverte (m <sup>2</sup> )	54.00
Coeficientes de forma		Coeficientes de reflexión	
Compacidad (Volumen/ΣSup.)	0.50	Suelo (%)	20%
Forma Suelo y techo. [a/p]	1.00	Fachada y Opuesta (%)	50%-50%
Forma Fachada y Opuesta [a/h]	1.00	Paredes Perpend. (%) [Izqda-Dcha]	50%-50%
Forma Paredes perpend. [p/h]	1.00	Techo (%)	80%
Plano de trabajo			
Altura (m)	0.80	Nº de puntos de estudio	841

Tabla 17: Condiciones geométricas y ópticas de las superficies opacas del modelo de referencia.

Los valores de iluminancia se miden en una malla de sensores colocados en el plano de trabajo, que es un plano horizontal ubicado a 0'80 m del suelo. Aunque en la norma 'UNE -EN 12464' [231] para lugares de trabajo interior (parte 1) se recomienda una distancia mínima de 0'50 m entre los sensores y las paredes para evitar los efectos de contorno, para el desarrollo de esta tesis se mantiene una distancia de 0'05 m para tener información sobre los valores que se obtienen en dicha franja perimétrica. Los sensores, además, guardan una distancia de 0'10 m entre ellos, tal como muestra la Figura 194.

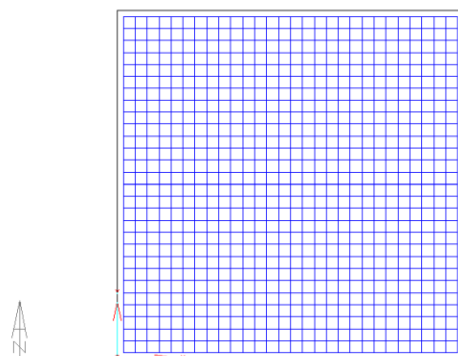


Figura 194: Malla con los sensores de iluminancia. P.M. Esquivias.

Respecto a las condiciones del entorno, éstas se componen de la determinación de la localización del modelo, de la orientación de la fachada acristalada y la ubicación de los elementos del entorno que puedan suponer una obstrucción a la entrada de luz natural al espacio [Tabla 18].

En primer lugar, se determina que la localización del modelo de referencia sea Sevilla (España). Las condiciones climáticas estandarizadas de Sevilla vienen recogidas en el archivo climático *ESP\_Sevilla.083910\_IWEC.epw*, obtenido de la base de datos de archivos climáticos disponibles para *EnergyPlus* del *Departamento de Energía de Estados Unidos* [355].

Las cuatro fachadas están orientadas según las cuatro direcciones cardinales, estando el hueco ubicado en la fachada orientada al Sur. La definición de la orientación de la fachada en la que se encuentra la superficie acristalada se basa en la rosa de los vientos donde el Norte representa un ángulo de 0°, por lo que la orientación Sur se considera 180°.

El modelo se considera exento en el espacio, sin ningún elemento en el entorno que suponga una obstrucción a la entrada de radiación solar al espacio, esto es, con un obstáculo que tiene un ángulo de elevación de 0°.

Condiciones exteriores		
Localización		Sevilla (37'42°N) clima mediterráneo
	Archivo climático	ESP_Sevilla.083910_IWEC.epw
Orientación		180° (S)
Obstrucción frontal:	Ángulo de elevación (°)	0.00°

Tabla 18: Condiciones exteriores del modelo de referencia.

La fachada Sur cuenta con un único hueco, es decir, una única ventana, cuya superficie es el 10% de la superficie del suelo (*Window-to-Floor ratio*). Definiendo un *factor de forma* del hueco de 1, se obtiene que la anchura y la altura de la ventana es igual a 0'95 m. Para considerar el máximo potencial de entrada de luz natural, el hueco se considera completamente acristalado, sin presencia de carpintería.

Además de la repercusión sobre la superficie de suelo, se proporciona la repercusión de la superficie de ventana sobre la superficie de la fachada que la contiene y sobre el volumen a

iluminar. Este hueco se mantiene en una posición central en la fachada, guardando una distancia de 1'03 m respecto a los límites del paramento que lo contiene.

Como se va a estudiar no sólo la cantidad de luz que atraviesa la ventana, sino también la cantidad de *radiación solar directa*, se especifica la *transmitancia visible, solar y térmica* del vidrio, así como su *coeficiente de ganancia solar*. Los datos de las características de un vidrio simple claro se han tomado de la *Base de Datos Internacional de Acristalamientos (International Glazing Database -IGDB)* [316]. Del mismo modo en que el modelo de referencia no cuenta con elementos en el entorno que supongan un obstáculo a la entrada de luz natural en el espacio, tampoco el modelo de referencia cuenta con ningún tipo de protección solar. En la Tabla 19 se muestran los valores relativos a las características de la ventana:

Características del Acristalamiento			
Sup. Ventana (m <sup>2</sup> )	0.90	Sup. Ventana/Suelo (%)	10.03%
Ancho av (m)	0.950	Sup. Ventana/Fachada (%)	10.03%
Alto hv (m)	0.950	Sup. Ventana/Volumen (%)	3.34%
Factor de forma (av/hv)	1.00	Transmitancia visible (%)	88.36%
Distancia Suelo y Techo [S-T]	1.03-1.03	Transmitancia solar (%)	77.07%
Distancia Paredes [Izqda-Dcha]	1.03-1.03	Coefficiente de Ganancia Solar (%)	81.80%
Nº de ventanas	1.00	Transmitancia Térmica (W/m <sup>2</sup> K)	5.6990

Tabla 19: Características de las superficies semitransparentes del modelo de referencia.

Respecto a las características térmicas de los elementos opacos, necesarios para definir el modelo energético [Figura 195], se toma como base los valores de transmitancia térmica límite establecidas en el '*Documento Básico de Ahorro de Energía DB-HE-1*' del *Código Técnico de la Edificación* [137].

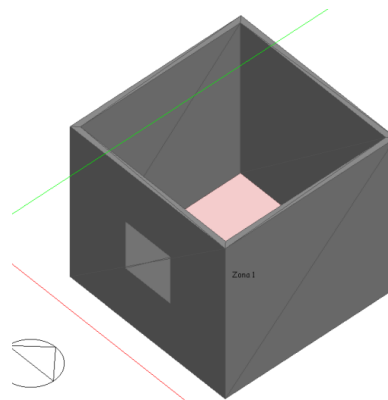


Figura 195: Definición geométrica del modelo de referencia en *DesignBuilder*. P.M. Esquivias.

Los valores de transmitancia térmica límite dependen de la zona climática en la que se encuentre el edificio, en este caso el modelo de cálculo. A efectos normativos, a Sevilla le corresponde una zonificación climática B4. Para la zona climática B4, el '*Documento Básico de Ahorro de Energía DB-HE-1*' [137], en su apéndice D, establece los siguientes valores de transmitancia térmica límite [Tabla 20] para los diferentes elementos de la envolvente térmica que se utilizan para la definición del modelo de referencia para el cumplimiento de los requisitos de limitación de la demanda energética:

Transmitancia térmica límite (W/m <sup>2</sup> K)	
Fachadas y cerramientos en contacto con el terreno	0'82
Suelos	0'52
Cubiertas	0'45

Tabla 20: Transmitancia térmica límite de los elementos de la envolvente del edificio de referencia para la zona climática B4 [137].





### 3.1.2 Condiciones climáticas

La cantidad total de luz disponible proveniente del Sol y la bóveda celeste difiere en función de las condiciones climáticas, que se ven afectadas por la turbiedad (contenido de vapor de agua y partículas en la atmósfera) y la nubosidad [21] [254] [356], reflejándose en la relación entre la *iluminancia global* y la *iluminancia difusa* anual. Además, la posición relativa entre el Sol y la Tierra influye en la *disponibilidad de luz natural (daylight availability)*, que varía con la latitud, ya que el número de horas diurnas y la cantidad de luz disponible decrecen a medida que nos alejamos del ecuador, entre otros factores [257] [258], de forma que las localidades próximas al ecuador generalmente tienen cielos con mayor *luminancia* que aquellas próximas a los polos, debido a la órbita terrestre alrededor del Sol [21].

Para trabajar con los programas de simulación energética se requiere de la adquisición de los *archivos climáticos estandarizados* para cada localidad; los archivos climáticos para *EnergyPlus* constituyen actualmente el dato de entrada por defecto en la gran mayoría de los programas de simulación. La base de datos de archivos climáticos para *EnergyPlus*, perteneciente al *Departamento de Energía de Estados Unidos* [355], está estructurada conforme a las regiones establecidas por la *Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization - WMO)*, perteneciente a la *Organización de las Naciones Unidas (ONU)* [Figura 196].

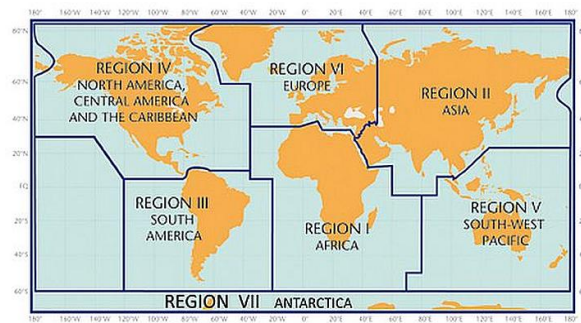


Figura 196: Límites de las regiones de la WMO. ([www.wmo.int](http://www.wmo.int))

Para estudiar el efecto de las condiciones climáticas sobre las condiciones de iluminación natural, se ha centrado el estudio a la región IV, que corresponde con Europa y Medio Oriente. La región IV [Figura 197] está formada por 50 países, pero la base de datos tan sólo cuenta con archivos climáticos provenientes de la fuente de datos *IWEC (International Weather data for Energy Calculations)* para 34 de sus miembros, de los cuales se toma el archivo climático de la capital del país. Para España, además, hay 5 archivos climáticos de fuente *IWEC*, que corresponden a las localidades de Santander, Barcelona, Palma de Mallorca, Valencia y Sevilla.

Actualmente existen diversos procedimientos para crear los archivos climáticos. La fuente de datos *IWEC* especifica la forma en que se han obtenido los datos meteorológicos y se han tratado para crear los archivos climáticos, siendo este procedimiento de los más extendidos. Para minimizar la presencia de errores, todos los archivos climáticos utilizados para la realización de esta investigación se han tomado de la misma fuente de datos, aunque haya otras fuentes disponibles para la misma localización.

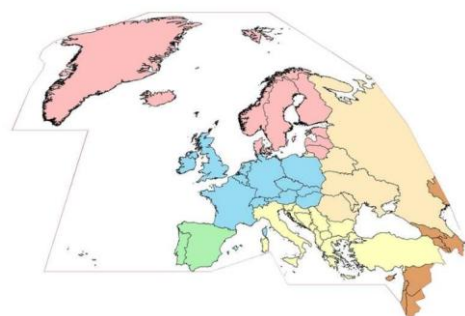


Figura 197: Subregiones de la Región IV: Europa Central y Occidental (azul), Países Nórdicos y Bálticos (rosa), Iberia (verde), Península Mediterránea, Itálica y Balcánica (amarillo), Europa del Este (naranja claro) y Medio Oriente (Naranja oscuro). ([www.wmo.int](http://www.wmo.int))

Por tanto, en un principio se parte de 39 localidades europeas y del medio oriente con archivo climático de fuente *INTEC* y formato «\*.epw», correspondientes a 34 capitales de países más otras 5 localidades españolas que son capitales de provincia y representativas del territorio nacional, desde un punto de vista climatológico.

Mediante la creación de *curvas de distribución de frecuencia* se ha representado la *iluminancia global horizontal* ( $E_{h,g}$ ) y la *iluminancia difusa horizontal* ( $E_{h,d}$ ) a partir de los datos recogidos en el archivo climático de cada localización [Figura 198]. Dado que el Criterio de Suficiente Luz Natural hace referencia al 50% del tiempo, se ha obtenido la mediana de la iluminancia global horizontal ( $E_{h,g\ med}$ ) y de la iluminancia difusa horizontal ( $E_{h,d\ med}$ ). Para reducir el número de localidades a estudiar se ha considerado la diferencia entre los valores de  $E_{h,g\ med}$  y  $E_{h,d\ med}$  que se obtienen a partir de los datos recogidos en el archivo climático. De esta forma se han detectado ciertas localidades con comportamientos similares y ha sido posible disminuir el número de casos.

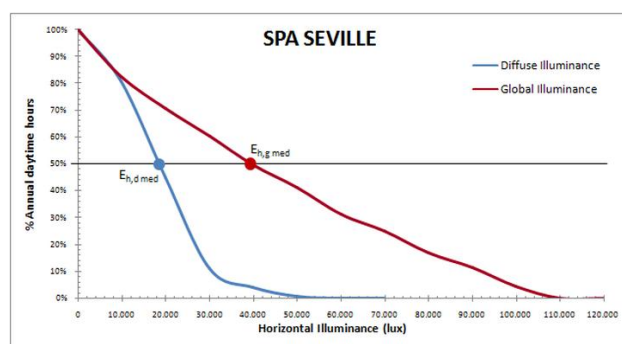


Figura 198: Curva de distribución de frecuencia de  $E_{h,g}$  y  $E_{h,d}$  según el archivo climático «\*.epw» disponible para Sevilla. P.M. Esquivias

Sin embargo éstos todavía eran numerosos, por lo que se ha procedido a aplicar más criterios de selección. En el cálculo del *Factor de Iluminación Natural (DF)*, el valor de  $E_{h,g}$  de referencia se obtiene de un nomograma cuyo dato de entrada es la latitud de la localización. Al clasificar las localizaciones por valor de  $E_{h,g\ med}$  y por latitud se obtuvo que en latitudes similares el valor de iluminancia era significativamente diferente, probablemente consecuencia de la variabilidad climática local.

Para registrar la variabilidad climática inherente a cada localidad y permitir la selección de las localidades más representativas, se incorporó como criterio la *clasificación climática Köppen* [Tabla 21] [357]. Con la incorporación de esta información se pretende establecer relaciones entre los resultados obtenidos y su condición climática, expresada en términos reconocidos internacionalmente.

Tª	Humedad							
	S	W	f	m	w	s	T	F
A: Tropical	-	-	Ecuatorial Af	Monzónico Am	Tropical de sabana Aw	Tropical de sabana As	-	-
B: Seco	Estepario BS	Desértico BW	-	-	-	-	-	-
C: Templado	-	-	Subtropical sin estación seca: Chino Cfa, Oceánico Cfb	-	Subtropical de altura Cwa, Cwb	Mediterráneo Csa Oceánico de veranos secos Csb	-	-
D: Continental	-	-	Continental Dfa, Dfb Subártico Dfc, Dfd	-	Manchuriano Dwa, Dwb	-	-	-
E: Frío	-	-	-	-	-	-	Clima de Tundra ET	Polar EF

Tabla 21: Clasificación climática de Köppen. [357]

La *clasificación climática de Köppen* consiste en una clasificación climática mundial que identifica cada tipo de clima con una serie de letras que indican el comportamiento de las temperaturas y precipitaciones que lo caracterizan. Para la región que se estudia, se observa que para una misma latitud se tienen diferentes climas, según el país, y que algunos países, debido a su extensión, presentan áreas con diferentes climas [Figura 199] [357]. Estas variaciones climáticas, por tanto, pueden ser un elemento clave a la hora de explicar las variaciones en los niveles de  $E_{h,g}$ .

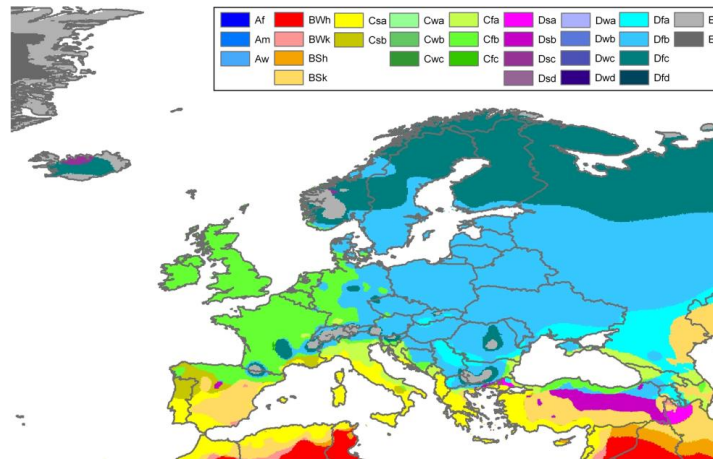


Figura 199: Mapa climático según la *clasificación climática de Köppen* de la región IV [357].

Tras la organización de las localidades de las que se dispone de archivo climático según la *clasificación climática de Köppen*, la diferencia entre la *disponibilidad de luz natural* difusa o global, su latitud y el valor de  $E_{h,d,med}$ , se seleccionan 13 capitales de los países de la región IV más las 5 capitales de provincias españolas, ordenadas según su latitud [Tabla 22, Figura 200]:

Nº	País	Ciudad	WMO Estación	Köppen	$\Delta E_g - E_d$ (%)	Latitud (°)	$E_{h,d,med}$ (lux)
1	ICL	REYKJAVIK	40300	Cfc	17,99%	64,13	11400
2	NOR	OSLO	14880	Dfb	15,17%	59,90	12300
3	RUS	MOSCOW	276120	Dfb	17,42%	55,75	14700
4	POL	WARSAW	123750	Cfb	19,78%	52,17	14600
5	UKR	KIEV	333450	Dfb	26,27%	50,40	17400
6	FRA	PARIS	71490	Cfb	22,17%	48,73	15800
7	B&H	BANJA LUKA	132420	Cfb	29,17%	44,78	17000
8	ROM	BUCHAREST	154200	Dfa	36,27%	44,50	18100
9	SPA	SANTANDER	080230	Cfb	28,40%	43,47	17400
10	ITA	ROME	162420	Csa	37,99%	41,80	19100
11	SPA	BARCELONA	081810	Csa	39,74%	41,28	18500
12	SPA	MADRID	082210	Csa	52,14%	40,45	16800
13	SPA	PALMA	083060	Csa	49,33%	39,55	18900
14	SPA	VALENCIA	082840	Csa	51,40%	39,50	17400
15	PRT	LISBON	85360	Csa	52,97%	38,73	18200
16	SPA	SEVILLE	83910	Csa	51,90%	37,42	19000
17	SYR	DAMASCUS	400800	Bsh	63,73%	33,42	17300
18	ISR	JERUSALEM	401840	Csa	61,67%	31,78	17400

Tabla 22: Localizaciones de la Region 6 seleccionadas tras aplicar los criterios indicados en el texto.

En el [Anexo A: Factor de Iluminación Natural en base climática] se muestra el estudio realizado sobre los archivos climáticos para la selección de los mismos como variables de cálculo, así como para la obtención del criterio de análisis de resultados en función a la disponibilidad de luz natural difusa exterior.

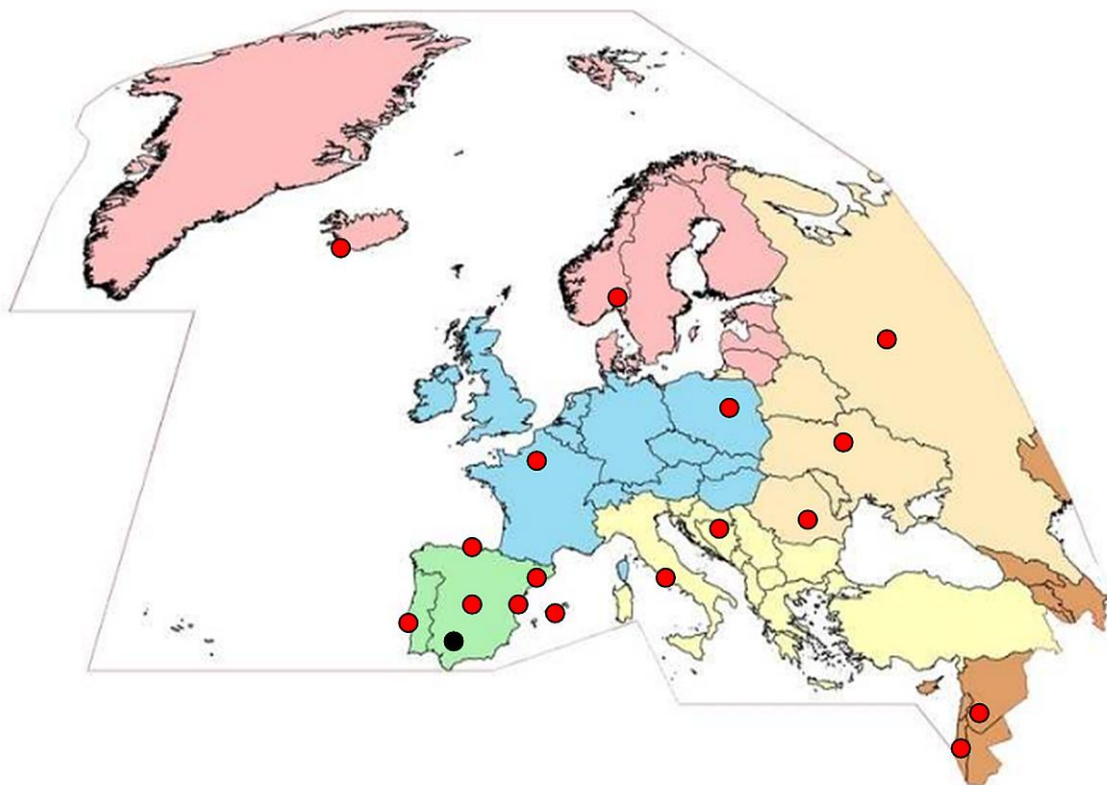


Figura 200: Ubicación en el mapa de las localizaciones seleccionadas, en negro Sevilla. *P.M. Esquivias*

### 3.1.3 Potencialidad del emplazamiento

La presencia de los elementos del entorno, como otros edificios, árboles o accidentes geográficos actúan como obstáculos que reducen la entrada de la luz natural a los edificios, bloqueando tanto la *radiación solar directa* como zonas de la bóveda celeste [3], es decir, la incidencia de *radiación solar difusa*.

Además, la orientación de las fachadas que contienen a los huecos determinará el acceso a la radiación solar de los edificios, no sólo por cuestiones lumínicas, sino también para aprovechar dicha radiación en invierno para ser utilizada como calefacción pasiva del edificio y diseñar las adecuadas protecciones para la época estival [3].

Los elementos del entorno forman parte de las condiciones de partida del proyecto arquitectónico, la orientación de las fachadas se define en las primeras etapas de diseño; ambos aspectos determinan no sólo las condiciones de iluminación natural sino también la exposición a la radiación solar directa a la que se va a ver sometidas las superficies de la envolvente térmica del edificio.

#### 3.1.3.1 Elementos del entorno

En función de las condiciones urbanísticas, de la evolución de la ciudad, de la densidad urbana, de la ubicación del espacio arquitectónico dentro de un edificio, etc., los espacios tendrán elementos en su entorno inmediato que obstruirán y limitarán su *exposición a la radiación solar*, directa y la difusa.

Si bien estos obstáculos pueden encontrarse en diferentes zonas de la semiesfera exterior al plano de fachada, es la obstrucción frontal (paralela al plano de fachada) la que tiene una mayor capacidad de bloquear el acceso solar, es decir, la que impone una mayor reducción de disponibilidad de iluminación natural.

El grado en que estas obstrucciones frontales impiden el acceso a la radiación solar directa depende de en qué medida se interponen entre la posición del Sol, cuyo azimut y elevación dependen de la localización y del momento del año, y el hueco, que “introduce” la luz en el espacio. Además, la parte de radiación difusa proveniente de la bóveda celeste que bloquean depende de las dimensiones del obstáculo.

Así como la posición solar se expresa en coordenadas polares, si expresamos la elevación de la obstrucción respecto al alféizar de la ventana en las mismas coordenadas, se podrá establecer la relación entre la altura ( $h$ ) y separación del obstáculo al edificio ( $d$ ), mediante la definición de un ángulo ( $\alpha$ ) [Figura 201].

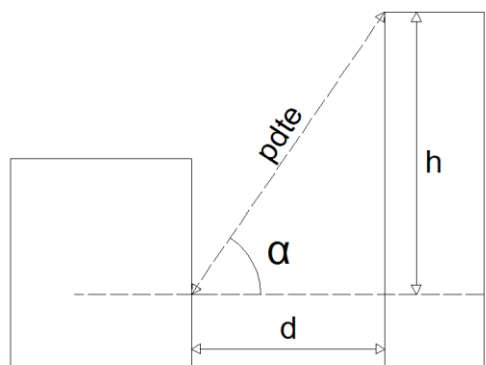


Figura 201. Ángulo de obstrucción frontal. P.M. Esquivias.

Fijando la localización de referencia en Sevilla, con una latitud de 37,42°, se obtiene que la elevación máxima del Sol es de 72,8°. En base a este rango, se han tomado 6 ángulos entre 0° (sin obstrucción) y 75°, ambos inclusive, tomados en pasos de 15°, que representen el panorama posible.

Manteniendo una distancia de separación entre la fachada donde se encuentra el hueco y la obstrucción en 1 m, por cada ángulo de obstrucción, medido como la elevación de la obstrucción frontal respecto al alféizar de la ventana, cuya altura es de 1,025 m, se determina la altura de la obstrucción y la inclinación respecto a la horizontal, expresada en porcentaje, siendo la tangente del ángulo de obstrucción. La presencia de obstáculos también supondrá el incremento de la componente reflejada exterior por reflexión en las superficies del entorno, por lo que, en base al Estado del Arte se ha fijado un coeficiente de reflexión de los elementos del entorno del 50%.

En la Tabla 23 se muestran los valores seleccionados del ángulo de obstrucción, que es la variable independiente, la altura del obstáculo y la pendiente respecto a la horizontal desde el alféizar son las variables dependientes. La distancia de separación se fija en un valor constante de 1 m y la extensión igual a la anchura de la fachada [Figura 202].

Nº	Ángulo (°)	Distancia (m)	Altura (m)	Pendiente (%)
1	0°	1 m	0.000 m	0.00%
2	15°	1 m	1.293 m	26.79%
3	30°	1 m	1.602 m	57.74%
4	45°	1 m	2.025 m	100.00%
5	60°	1 m	2.757 m	173.21%
6	75°	1 m	4.757 m	373.21%

Tabla 23: Valores del ángulo de obstrucción y de sus variables dependientes

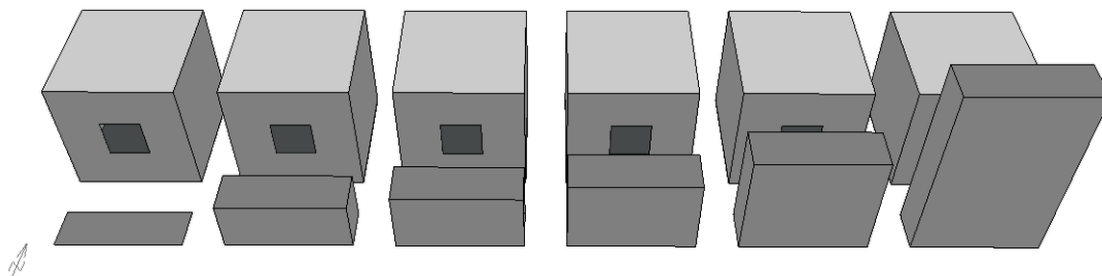


Figura 202: Definición geométrica de los modelos de cálculo en *Ecotect*. De izquierda a derecha: ángulo de obstrucción de 0°, 15°, 30°, 45°, 60° y 75°. P.M. Esquivias.

### 3.1.3.2 Orientación

El grado de exposición solar, directa y difusa, de una fachada de un edificio depende del azimut de la pared, es decir, la orientación de la misma y de su inclinación. Ésta además influye en otros parámetros del diseño pasivo de un edificio tales como el diseño de los elementos de protección solar o el comportamiento de la envolvente solar.

Si bien los elementos del entorno están relacionados con la posición solar a través del ángulo de elevación, la orientación de la fachada acristalada se relaciona con la posición solar a través del ángulo azimutal. Sin embargo, en orientaciones que se encuentran fuera del rango del ángulo azimutal en que el Sol está por encima del horizonte, el espacio recibe radiación solar difusa, por las reflexiones del entorno y la proveniente de la bóveda celeste, cuya luminancia depende, además de la nubosidad, de la posición solar.

Por ello, tomada la rosa de los vientos, se adopta como variable el ángulo de orientación cuyos valores son los 4 rumbos cardinales, los 4 rumbos laterales y los 8 rumbos colaterales, formando un conjunto de 16 valores.

Aunque en base al sistema de referencia solar, utilizado para el ángulo azimutal, se considera el ángulo 0° en el punto cardinal Sur, en la definición de los valores de estudio se ha mantenido el criterio del sistema georreferencial, en el que el ángulo 0° se corresponde con el punto cardinal Norte, por tener una mayor expansión y ser el utilizado también en los programas de simulación. De esta forma se tienen los siguientes valores:

Nº	Orientación	Ángulo (°)
1	N Norte N	0°
2	NNE Nornordeste	22'5°
3	NE Nordeste	45°
4	ENE Estenordeste	67'5°
5	E Este	90°
6	ESE Estesudeste	112'5°
7	SE Sudeste	135°
8	SSE Sursureste	157'5°
9	S Sur	180°
10	SSO Sursuroeste	202'5°
11	SO Suroeste	225°
12	OSO Oeste suroeste	247'5°
13	O Oeste	270°
14	ONO Oeste noroeste	292'5°
15	NO Noroeste	315°
16	NNO Nornoroeste	337'5°

Tabla 24: Valores del ángulo de orientación.

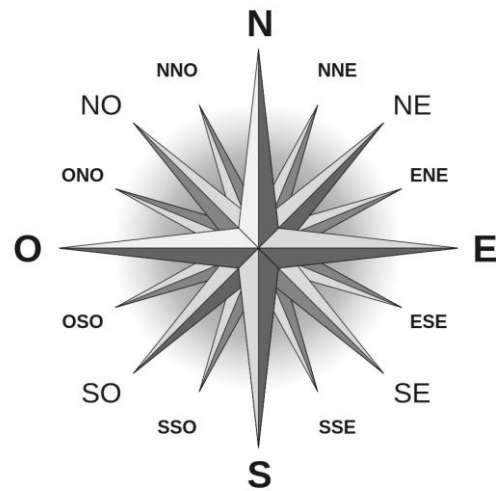


Figura 203: Rosa de los vientos donde se muestran los 16 valores de estudio

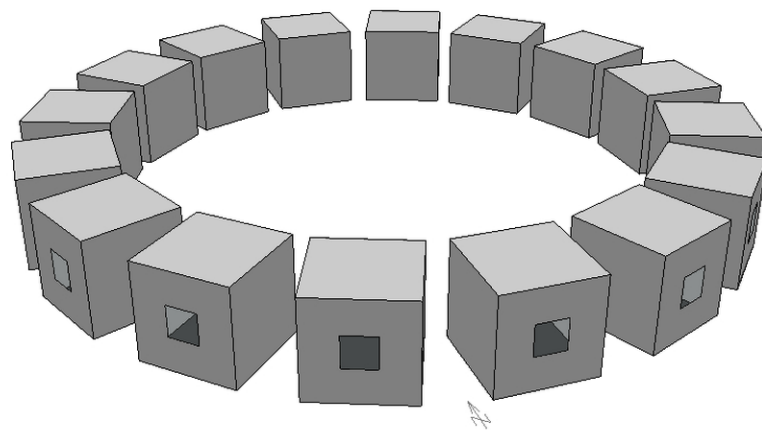


Figura 204: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie "Orientación" en Ecotect. P.M. Esquivias





### 3.1.4 El proyecto arquitectónico

El proyecto arquitectónico determina el *potencial de iluminación natural* de cada una de las zonas o espacios del edificio [71]. La Arquitectura es la que conforma el ambiente luminoso [4]. La configuración, las necesidades del programa y las características del proyecto arquitectónico pueden dar lugar a recurrir a diferentes recursos de diseño o sistemas de iluminación natural que forman parte de la envolvente del edificio. La envolvente del edificio es el elemento que permite la entrada de luz natural a los espacios interiores a través de la apertura de huecos, así como el control de la cantidad de la misma a través de la incorporación de protecciones solares.

La envolvente del edificio tiene la función de regular la relación entre las condiciones exteriores y las interiores. Considerando la iluminación natural, son los huecos ubicados en la envolvente los elementos de admisión de luz natural permitiendo la entrada de la misma en los espacios, sin olvidar que la equivalente a la incidencia directa de luz natural es una carga térmica conocida como ganancia solar.

La reducción del espesor de las paredes exteriores y el aumento de la superficie de ventana en las fachadas en la arquitectura moderna hace que sea más difícil el diseño de unas buenas condiciones de iluminación natural, siendo necesaria la utilización de elementos de control, es decir, elementos de protección solar, no sólo para evitar el sobrecalentamiento de los espacios interiores sino también para controlar el nivel de iluminación interior y evitar que se produzcan problemas de deslumbramiento [9].

#### 3.1.4.1 Elementos de admisión de luz natural: los huecos

El diseño de los huecos, de las ventanas y lucernarios, para admitir luz natural en un espacio, implica la determinación de multitud de variables. La mayoría de ellas actualmente es más fruto de intuiciones y de decisiones subjetivas del arquitecto que de una reflexión y una decisión con base objetiva sobre cómo van a afectar a las condiciones ambientales interiores.

Otros factores, como el tamaño de los huecos y su transmitancia (térmica) sí se han comenzado a tener en cuenta en el proyecto arquitectónico, especialmente desde la aprobación en 2006 del *Código técnico de la Edificación* [241], donde se contemplaba el cumplimiento del *Documento Básico de Limitación de Demanda Energética* a través de un procedimiento prescriptivo basado en la obtención de un valor del parámetro característico menor que los valores límites y máximos marcados por la norma.

En este contexto, el tamaño y las características térmicas de los huecos juegan un papel fundamental a la hora de determinar dichos parámetros. Sin embargo, con la actualización del *Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación* [137] en 2013, sólo se permite el método prestacional, donde se da una mayor libertad a la hora de elegir el tamaño y el producto de ventana para cumplir con los requisitos marcados en la normativa.

#### Tamaño del hueco

En la disciplina de iluminación natural, la superficie de ventana no se expresa normalmente en términos absolutos, sino que siempre se pone en relación con el espacio al que pertenece, como un elemento «dependiente» del mismo, cuya existencia no tiene sentido fuera del mismo.

Existen diversas formas de expresar en términos relativos la superficie de ventana que ilumina un espacio:

1. Si se considera la relación entre la superficie de la ventana y el espacio que necesita ser iluminado se emplea la expresión *Superficie relativa de ventana respecto al volumen iluminado (Window to Volume ratio -WVR)*.
2. Sin embargo, considerando un punto de vista más «utilitarista» de la iluminación natural, ésta se mide en el plano de trabajo, que es un plano horizontal que se ubica generalmente a 0'8 m del suelo. Siendo este plano paralelo al suelo, y teniendo en cuenta que la repercusión de ventana sobre la superficie del mismo podía ser un indicador del potencial de iluminación natural, durante mucho tiempo se ha utilizado la expresión *Superficie relativa de ventana respecto a la superficie de suelo (Window to Floor ratio -WFR)*.
3. Por último, si se considera la relación entre la superficie de ventana y la superficie teórica del paramento que la contiene se emplea la expresión *Superficie relativa de hueco respecto a la superficie de pared (Window to Wall ratio -WWR)*. Esta expresión es muy utilizada en los programas de simulación energética para la parametrización de la envolvente térmica y permite un mayor acercamiento a la consideración de la porción de la bóveda celeste que “ve” la ventana (definición hemiesférica del hueco).

Expresado este término como un porcentaje de la superficie de fachada, o de techo en el caso de lucernarios, se toman 11 valores distintos, que abarcan desde la máxima superficie de ventana (100% WWR) a la superficie mínima. En España la superficie mínima de ventana de los espacios habitables, según documentos legislativos, debe ser de al menos el 10% WFR, por lo que se plantea como superficie mínima un caso extremo intermedio a la ausencia de ventana.

El tamaño de ventana afecta a diversas cuestiones geométricas. En primer lugar, al modificar la superficie de la ventana, los ratios entre dicha superficie y la superficie del suelo o el volumen del espacio también se van a ver modificados. Por otro lado, al variar el tamaño, también se modifica la altura del alféizar y la altura de la ventana, así como su distancia a las paredes perpendiculares a la fachada.

Manteniendo como constantes en esta serie, el tamaño del espacio, la forma de la ventana como cuadrada (ancho = alto), así como su posición central en la fachada (misma distancia a los cuatro paramentos que delimitan la fachada) y una sola ventana conteniendo toda la superficie, se definen los siguientes valores [Tabla 25] que dar lugar a la creación de los modelos de cálculo [Figura 205]:

Nº	WWR	Sup (m <sup>2</sup> )	Alto/Ancho	Distancia (m)	WFR	WVR
1	5%	0.45	0.671	1.16	5%	1.67%
2	10%	0.90	0.950	1.03	10%	3.34%
3	20%	1.80	1.342	0.83	20%	6.67%
4	30%	2.70	1.644	0.68	30%	10.00%
5	40%	3.60	1.898	0.55	40%	13.34%
6	50%	4.50	2.121	0.44	50%	16.67%
7	60%	5.40	2.324	0.34	60%	20.00%
8	70%	6.30	2.510	0.25	70%	23.33%
9	80%	7.20	2.684	0.16	80%	26.67%
10	90%	8.10	2.864	0.08	90%	30.00%
11	100%	9.00	3.000	0.00	100%	33.33%

Tabla 25: Valores de Superficie de ventana y sus variables dependientes.

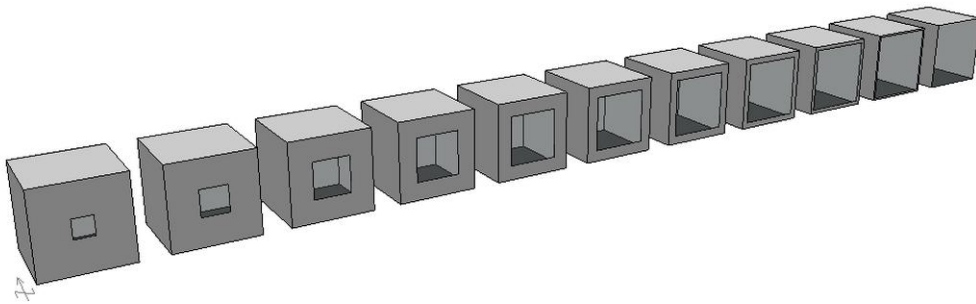


Figura 205: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Superficie de ventana” en *Ecotect*. De izquierda a derecha: WWR de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 %. P.M. Esquivias

### Transparencia del hueco

Del mismo modo en que el tamaño determina la cantidad de luz que entra en el espacio, también las características físicas constituyen un filtro a la cantidad de radiación que se deja pasar a su través. La materialidad del sistema de acristalamiento del hueco se caracteriza por su *transmitancia térmica, visible y solar*, entre otras propiedades, todas ellas interrelacionadas.

Existe una gran diversidad de sistemas de acristalamientos en el mercado, desarrollados para fomentar o impedir la entrada de determinadas longitudes de onda de la *radiación solar incidente*, pertenecientes a diferentes rangos del espectro electromagnético.

La propiedad que determina la cantidad de radiación solar en rango visible que atraviesa el material es la *transmitancia visible* ( $\tau_{vis}$ ), cuyo rango de valores puede variar de 0% a 100%. En principio, el planteamiento era estudiar variaciones del 10%, siendo estos valores la estratificación ideal del estudio.

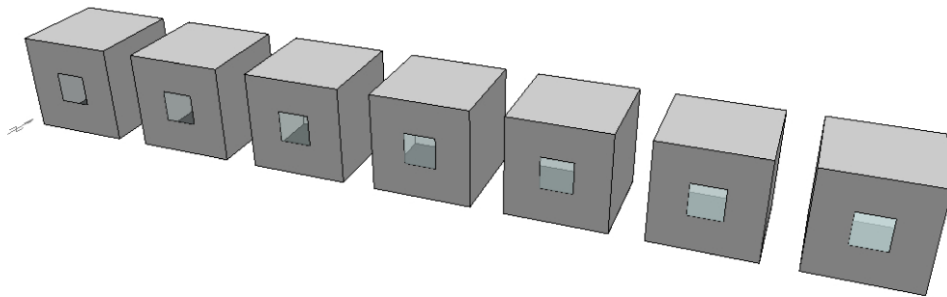


Figura 206: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Transparencia” en *Ecotect*. De izquierda a derecha:  $\tau_{vis}$  de aproximadamente 90, 80, 70, 60, 50, 40 y 30 %. P.M. Esquivias

Sin embargo, considerando la disponibilidad de productos de ventana, para escoger los valores de estudio se ha tomado la lista de sistemas de acristalamiento de la última versión del programa *WINDOW* (versión 7.3.4) del *Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley*. Esta lista recoge los productos más representativos del mercado internacional, creados a partir de elementos pertenecientes de la *Base de Datos Internacional de Acristalamiento* (versión 39.0.0) [316].

Considerando el rango de productos, y siendo el objetivo estudiar la variación de la transmitancia visible, se han escogido los sistemas de acristalamiento cuya transmitancia visible más se aproximara a los valores que se habían planteado como ideales. Escogido el sistema de acristalamiento según su transmitancia visible, éstos llevan aparejados unos valores determinados

de transmitancia solar directa y total (también conocido como Coeficiente de Ganancias Solares - SHGC) y de transmitancia térmica ( $U - W/m^2K$ ).

El *Coeficiente de Ganancias Solares* caracteriza la transparencia del acristalamiento a la radiación solar directa. La *transmitancia térmica* es, actualmente, el parámetro relativo a la ventana que más se tiene en cuenta y del que se tiene mayor control y conocimiento. La Tabla 26 muestra las características de los productos de ventana seleccionados y la Figura 206 los modelos de cálculo.

Nº	Valor	Sistema de Acristalamiento	Transmitancia			
			Visible (VT)	Solar directa (ST)	Solar Total (SHGC)	Térmica ( $U - W/m^2K$ )
1	90%	Generic Clear Glass 6 mm	0.884	0.771	0.817	5.810
2	80%	Double Clear with Argon	0.813	0.710	0.765	2.576
3	70%	Triple Clear	0.700	0.502	0.623	1.744
4	60%	ViewGlass 6 mm	0.586	0.395	0.465	1.892
5	50%	Triple Low-e Argon	0.514	0.222	0.318	0.700
6	40%	Sage blue	0.409	0.217	0.308	1.834
7	30%	Thermochromic Gray	0.322	0.262	0.388	2.666

Tabla 26: Productos de ventana disponibles en el mercado, escogidos según su transmitancia visible.

### Posición del hueco

En la disciplina de la iluminación natural, el plano de trabajo es el elemento de referencia para medir la iluminancia obtenida en cada punto de estudio en dicho plano. A cada punto, además de la luz que procede del exterior, le llega la luz reflejada por los paramentos interiores. La posición del hueco en el paramento de la fachada marca la relación geométrica entre la entrada de luz exterior y el plano de trabajo, expresada mediante el coseno del ángulo que forman, dando lugar a la presencia de manchas solares a diferentes profundidades en función de la altura del hueco.

Además, la posición relativa del hueco en el paramento que lo contiene, su proximidad a los límites del mismo, provoca la incidencia de luz natural directa en los paramentos perpendiculares al mismo, convirtiéndolos, por reflexión, en fuentes secundarias de iluminación natural.

Partiendo de la ventana de referencia, se plantean diferentes opciones, considerando la proximidad del hueco a los límites del paramento. La posición relativa de los huecos se expresa como una variación de la distancia del alféizar, el dintel y las jambas de la ventana a los límites del paramento.

Por convención, la posición derecha e izquierda se toma mirando al modelo frontalmente desde el exterior. La Tabla 27 muestra las posiciones objeto de estudio y las distancias que guarda el límite de la ventana con los paramentos que delimitan al plano de fachada, vistas desde el exterior. La Figura 207 muestra los modelos de cálculo creados a tal efecto.

Nº	Posición	Dist. Suelo (m)	Dist. Techo (m)	Dist. Pared Dcha (m)	Dist. Pared Izqda (m)
1	Centro-Centro (CC)	1.03	1.03	1.03	1.03
2	Centro-Dcha (CD)	1.03	1.03	0.00	2.05
3	Centro-Izqda (CI)	1.03	1.03	2.05	0.00
4	Superior-Centro (SC)	2.05	0.00	1.03	1.03
5	Superior-Dcha (SD)	2.05	0.00	0.00	2.05
6	Superior-Izqda (SI)	2.05	0.00	2.05	0.00
7	Inferior-Centro (IC)	0.00	2.05	1.03	1.03
8	Inferior-Dcha (ID)	0.00	2.05	0.00	2.05
9	Inferior-Izqda (II)	0.00	2.05	2.05	0.00

Tabla 27: Posiciones relativas y distancias a los paramentos

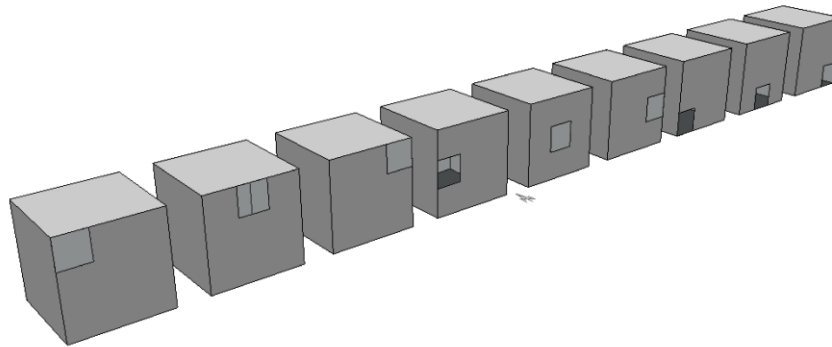


Figura 207: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie "Posición" en *Ecotect*. De izquierda a derecha: Posición de la ventana SI, SC, SD, CI, CC, CD, II, IC e ID. *P.M. Esquivias*

### Forma del hueco

Actualmente existe una gran variedad de formas de las ventanas. Más allá de las preferencias psicológicas de los usuarios, o de cuestiones subjetivas del proyectista, se sabe que la forma del hueco afecta a la distribución de luz natural en el espacio y, según la misma, también puede afectar a la cantidad de luz natural que se recibe en el plano de trabajo.

El *factor de forma* se define como la relación entre la anchura y la altura del hueco. Para contemplar las posibles variaciones, se plantean diferentes relaciones entre ambas dimensiones del hueco, manteniendo constante la superficie de hueco, dando lugar a las ventanas verticales, con una altura mayor que la anchura, y a las ventanas horizontales, con una anchura mayor que la altura, cubriendo un rango que abarca desde una relación de 0'10 a 10.

La modificación de la relación de ambas dimensiones, manteniendo la superficie de hueco, también afecta a la distancia que guardan su alféizar, su dintel y sus jambas a los límites del paramento, pese a mantener la posición central.

La Tabla 28 muestra los valores seleccionados para el *Factor de forma de la ventana* y los parámetros que se ven afectados, como las dimensiones de la ventana y la distancia a los paramentos que delimitan la fachada. La Figura 208 muestra los modelos de cálculo creados en *Ecotect*.

Nº	Factor de forma	Ancho (m)	Alto (m)	Dist. Paredes (m-m)	Dist Suelo-techo (m-m)
1	0.10 (1/10)	0.30	3.00	1.35-1.35	0.00-0.00
2	0.125 (1/8)	0.34	2.69	1.33-1.33	0.16-0.16
3	0.20 (1/5)	0.42	2.15	1.29-1.29	0.43-0.43
4	0.25 (1/4)	0.48	1.90	1.26-1.26	0.55-0.55
5	0.50 (1/2)	0.67	1.35	1.17-1.17	0.83-0.83
6	0.625 (1/1'6)	0.75	1.20	1.12-1.12	0.90-0.90
7	0.80 (1/1'25)	0.85	1.06	1.08-1.08	0.97-0.97
8	1.00 (1/1)	0.95	0.95	1.03-1.03	1.03-1.03
9	1.25 (1'25/1)	1.06	0.85	0.97-0.97	1.08-1.08
10	1.60 (1'6/1)	1.20	0.75	0.90-0.90	1.12-1.12
11	2.00 (2/1)	1.35	0.67	0.83-0.83	1.17-1.17
12	4.00 (4/1)	1.90	0.48	0.55-0.55	1.26-1.26
13	5.00 (5/1)	2.15	0.42	0.43-0.43	1.29-1.29
14	8.00 (8/1)	2.69	0.34	0.16-0.16	1.33-1.33
15	10.00 (10/1)	3.00	0.00	0.00-0.00	1.35-1.35

Tabla 28: Valores del Factor de Forma y de los parámetros afectados

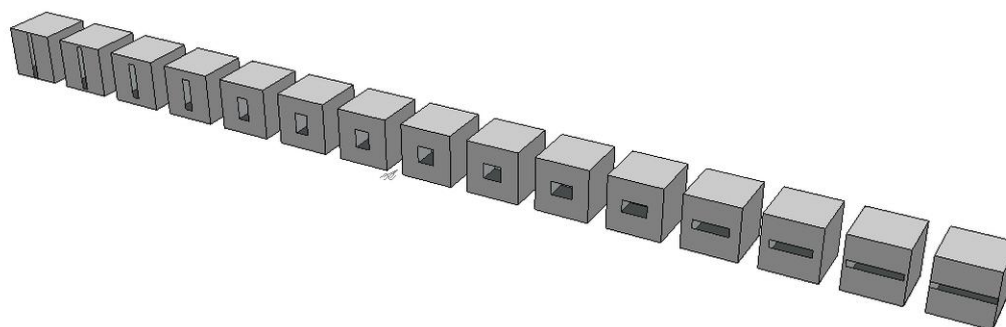


Figura 208: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Forma” en *Ecotect*. De la relación 0’1 (ventana con la máxima altura) a la relación 10 (ventana con la máxima anchura). P.M. Esquivias

### División del hueco

En muchas ocasiones, por razones estéticas, por la extensión del espacio o cualquier otro motivo, la superficie de la fachada perteneciente a un espacio no se horada sólo con un único hueco, sino que la superficie total de acristalamiento, definida principalmente por cuestiones energéticas, es dividida en varios huecos.

Para estudiar el efecto de esta opción proyectual, se plantea la creación de una matriz cuyo número de filas y columnas corresponde con la división de la superficie de hueco en sentido vertical (del suelo al techo) y en sentido horizontal (de pared a pared) respectivamente. Esta superficie dividida se distribuye equitativamente, de forma que la distancia entre los huecos resultantes es igual a la distancia que guardan los huecos extremos con los límites del paramento de fachada.

Al dividir la superficie en diferentes partes se ven afectados otros parámetros relativos a la geometría de la ventana como el coeficiente de forma. En total se plantean 13 variaciones sobre la división y distribución de la superficie de hueco en la superficie de la fachada [Figura 209]. La Tabla 29 muestra sus características geométricas, así como los valores de los parámetros afectados:

Nº	Matriz	Nº huecos	Factor de Forma	Ancho (m)	Alto (m)	Dist. Horizontal (m)	Dist. Vertical (m)
1	1x1	1	1.00	0.95	0.95	1.03	1.03
2	2x1	2	2.00	0.95	0.475	1.03	0.68
3	3x1	3	3.00	0.95	0.317	1.03	0.51
4	4x1	4	4.00	0.95	0.238	1.03	0.41
5	5x1	5	5.00	0.95	0.190	1.03	0.34
6	1x2	2	0.50	0.475	0.95	0.68	1.03
7	1x3	3	0.33	0.317	0.95	0.51	1.03
8	1x4	4	0.25	0.238	0.95	0.41	1.03
9	1x5	5	0.20	0.190	0.95	0.34	1.03
10	2x2	4	1.00	0.475	0.475	0.68	0.68
11	3x3	9	1.00	0.317	0.317	0.51	0.51
12	4x4	16	1.00	0.238	0.238	0.41	0.41
13	5x5	25	1.00	0.190	0.190	0.34	0.34

Tabla 29: Opciones de división de ventana y parámetros afectados

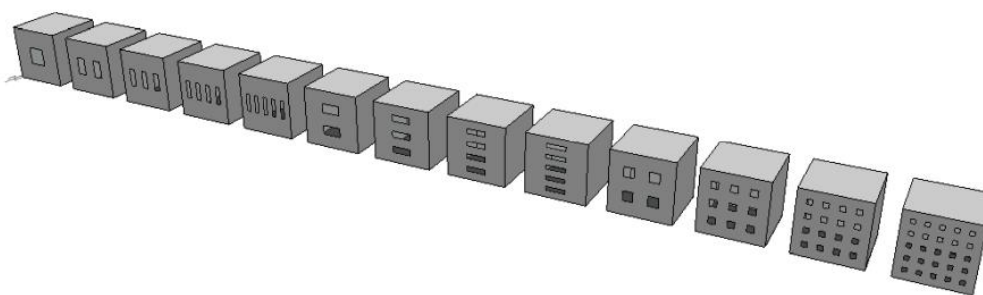


Figura 209: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “División” en *Ecotect*. De la 1x1 a la matriz 5x5. P.M. Esquivias

### Distribución de los huecos

Aunque generalmente los espacios, especialmente en el ámbito doméstico, suelen tener sólo un paramento vertical exterior en el que se localiza la ventana, dando lugar lo que se conoce como una iluminación natural unilateral, en los espacios amplios, más singulares, es posible que la entrada de luz natural provenga de ventanas ubicadas en diferentes cerramientos. Si participan dos paramentos se tiene una iluminación natural bilateral, ya sea perpendicular u opuesta, mientras que si participan más paramentos se obtiene una iluminación natural multilateral.

Se propone, por tanto, manteniendo la superficie de acristalamiento, el factor de forma y la posición centralizada de la ventana en el paramento, dividir dicha superficie y distribuir las partes resultantes en diferentes paramentos verticales, conservando siempre una porción en la fachada original [Figura 210], dando lugar a 8 situaciones distintas, tal como se muestra en la Tabla 30.

Nº	Nº ventanas	Forma	Alto (m)	Dist. Límites (m)	Orientación fachadas	Nombre
1	1	1.00	0.950	1.03	Sur(180°)	1_S
2	2	1.00	0.475	1.26	Norte (0°)-Sur (180°)	2_NS
3	2	1.00	0.475	1.26	Este (90°)-Sur (180°)	2_ES
4	2	1.00	0.475	1.26	Sur(180°)-Oeste(270°)	2_SO
5	3	1.00	0.317	1.34	Este (90°)-Sur(180°)-Oeste(270°)	3_ESO
6	3	1.00	0.317	1.34	Norte (0°)-Este(90°)-Sur(180°)	3_NES
7	3	1.00	0.317	1.34	Norte (0°)-Sur(180°)-Oeste(270°)	3_NSO
8	4	1.00	0.238	1.38	Norte(0°)-Este(90°)-Sur(180°)-Oeste(270°)	4_NESO

Tabla 30: Distribución de ventanas en diferentes paramentos.

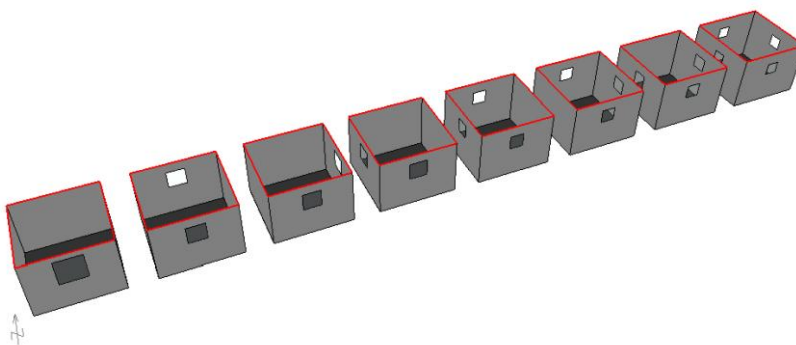


Figura 210: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Distribución” en *Ecotect*. De izquierda a derecha: modelos 1\_S, 2\_NS, 2\_ES, 2\_SO, 3\_NSO, 3\_NES, 3\_ESO y 4\_NESO. P.M. Esquivias

### 3.1.4.2 Elementos de control: las protecciones solares

---

Como ya se ha indicado, una excesiva iluminación natural provoca problemas de confort visual y de deslumbramiento a los usuarios; una excesiva ganancia solar representa una de las fuentes más importantes de sobrecalentamiento de los espacios, especialmente en verano [71] [10].

Estos problemas generalmente aparecen cuando se diseñan los espacios con grandes superficies de acristalamiento o inadecuadas para la orientación de la fachada que la contiene. A medida que aparecen estos problemas de discomfort lumínico y térmico se tiende a utilizar elementos de control, que reduzcan la entrada de radiación solar directa en el espacio y, en muchos casos, también la entrada de radiación solar difusa [9] [306].

Los elementos de protección solar pueden localizarse en el exterior, el interior o en las capas intermedias del sistema de acristalamiento. Frente a las interiores o intermedias, las protecciones solares exteriores permiten controlar la cantidad de radiación solar directa que entra en un espacio mediante el bloqueo de la radiación solar directa que incide en la ventana [320] [95].

Las protecciones solares fijas o móviles, pueden ser controladas manualmente o mediante un sistema de regulación. Las protecciones solares fijas, además, suelen definirse en el proyecto arquitectónico, formando parte de la imagen exterior del edificio, mientras que las protecciones solares móviles interiores son más susceptibles de ser incorporadas por el propietario del espacio.

Ante la gran incertidumbre que supone la predicción del comportamiento del ser humano y su interacción con los dispositivos de protección solar móvil, así como el margen de error que presenta el funcionamiento de los sistemas automáticos para alcanzar los niveles de confort, esta investigación se centra exclusivamente en los elementos de protección solar fija, es decir, en la incorporación en la fachada del edificio de voladizos, salientes laterales, lamas fijas verticales u horizontales que reducen la exposición a la radiación solar de la ventana bajo una geometría determinada e invariable.

Mientras la incorporación de elementos de protección solar se está convirtiendo en una práctica cada vez más común para la reducción de la demanda energética de los edificios, especialmente desde que han aumentado el valor de los requisitos de cumplimiento normativos y la revisión de la *'Directiva Europea 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios'* pone énfasis en la reducción del consumo energético de refrigeración [137] [244], éstas también afectan a las condiciones de iluminación natural de los espacios.

La incorporación de las protecciones solares puede reducir el consumo energético de los sistemas térmicos, y también del sistema de iluminación artificial, pero un exceso de protección puede provocar el efecto contrario, aumentando el consumo energético del edificio. Si bien se sabe de los problemas derivados de una falta de protección solar, una excesiva protección dará lugar a una falta permanente de luz natural, por lo que se consumirá energía en iluminación artificial durante todas las horas del año; además, puede bloquear el acceso solar directo en invierno, dando lugar a un incremento en la demanda energética de calefacción, aumentando, por tanto, también su consumo de energía.

El principio de funcionamiento de las protecciones solares es la obstrucción de una determinada porción de la bóveda celeste, por la que, durante un determinado periodo anual, transita el Sol debido al movimiento rotacional y traslacional de la Tierra. En base a esta interposición se reduce la radiación solar, directa y difusa, que entra en el espacio modificando las condiciones ambientales interiores.



## Voladizo

Los voladizos se utilizan generalmente como una estrategia de reducción de la demanda energética de verano para proteger las ventanas de las fachadas orientadas al Sur, ya que, bajo ese azimut la elevación solar es mayor en la época estival, de forma que puede diseñarse el voladizo para que la posición solar quede oculta tras el ángulo de obstrucción de la bóveda celeste, al mismo tiempo que permiten el acceso solar durante el invierno, en que la elevación solar es menor, estando fuera del área de la bóveda celeste bloqueada.

Los voladizos son dispositivos de protección solar que se basan en la incorporación de un elemento plano horizontal sobre la ventana de forma que obstruye la parte superior de la bóveda celeste que «ve» la ventana, generalmente medida desde el alféizar.

Considerando que la ventana «ve» sólo la mitad de la bóveda celeste, ya que la otra mitad está oculta por la misma fachada que la contiene, la amplitud del ángulo de elevación ( $\psi$ ) de visión del cielo es de  $90^\circ$ , sin presencia de obstrucciones en el entorno y sin elementos de protección solar. La incorporación de un voladizo supone la reducción de dicho ángulo de visión, siendo el ángulo de obstrucción su ángulo complementario.

Para la definición de las diferentes opciones de voladizos se define el ángulo de obstrucción, el cual determina la dimensión del ángulo de visión de cielo que es visible por el punto central del alféizar de la ventana, considerando el modelo exento. Según la geometría del recorrido solar en Sevilla, la mínima elevación del Sol a las 12 h solares es de  $29'2^\circ$ , por lo que se decide fijar como valor máximo de ángulo de obstrucción en  $60^\circ$  y se seleccionan valores múltiplos de  $15^\circ$ , dando lugar al resto de los casos de estudio.

El ángulo de obstrucción ( $\alpha$ ), basándose en que el voladizo se coloca justo sobre el dintel de la ventana, determina la profundidad del voladizo ( $d$ ) [Figura 211]. Como elementos constantes en la definición de los mismos se encuentran además de su ubicación, la anchura del voladizo que es igual a la de la ventana, y su coeficiente de reflexión que es de 50% [Tabla 31, Figura 212].

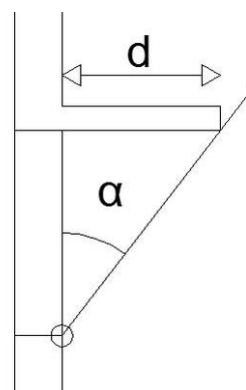


Figura 211: Relación entre el ángulo de obstrucción ( $\alpha$ ) y la profundidad ( $d$ ) del voladizo. P.M. Esquivias

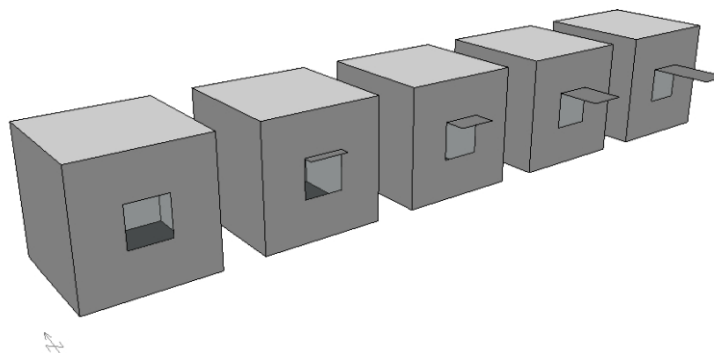


Figura 212: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Voladizo” en Ecotect. De izquierda a derecha: ángulo de obstrucción de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ . P.M. Esquivias

Aunque para que no hubiera entrada de luz en el espacio proveniente de la región cubierta por el voladizo, éste debiera tener una extensión infinita, se ha determinado definirlo con una extensión igual a la anchura de la ventana al considerar que habitualmente ésta es la dimensión mínima de los voladizos y que una mayor extensión provocará una mayor reducción de las condiciones que resulten de estos casos de estudio.

Nº	Ángulo de obstrucción (°)	Ángulo de elevación visible (°)	Rango visible (°)	Profundidad (m)
1	0°	90°	0° a 90°	0.00
2	15°	75°	0° a 75°	0.25
3	30°	60°	0° a 60°	0.55
4	45°	45°	0° a 45°	0.95
5	60°	30°	0° a 30°	1.65

Tabla 31: Valores de Ángulo de obstrucción del voladizo y su profundidad

### Saliente lateral

Si bien los voladizos ocultan la parte superior de la bóveda celeste que puede «ver» la ventana, los salientes laterales obstruyen determinados rangos de azimuth cubriendo un determinado rango de ángulos de elevación. Los salientes laterales por tanto permiten bloquear la radiación solar del Sol cuando éste tiene una menor elevación ( $\gamma$ ). En la definición geométrica de los salientes laterales se considera el ángulo de obstrucción del mismo ( $\alpha$ ), medido desde la jamba de la ventana opuesta a la ubicación del saliente.

Una vez definido el ángulo de obstrucción del saliente lateral ( $\alpha$ ) se obtiene la amplitud del ángulo de azimuth visible desde el punto opuesto del alféizar y la profundidad del saliente ( $d$ ) [Figura 213], considerando que el saliente se coloca en la jamba de la ventana, manteniendo una altura constante igual a la altura de la ventana y con un coeficiente de reflexión del 50%.

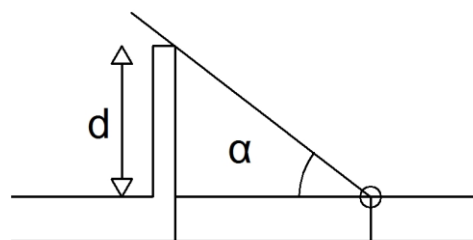


Figura 213: Ángulo de obstrucción de azimuth ( $\alpha$ ) y profundidad ( $d$ ) del saliente lateral. P.M. Esquivias

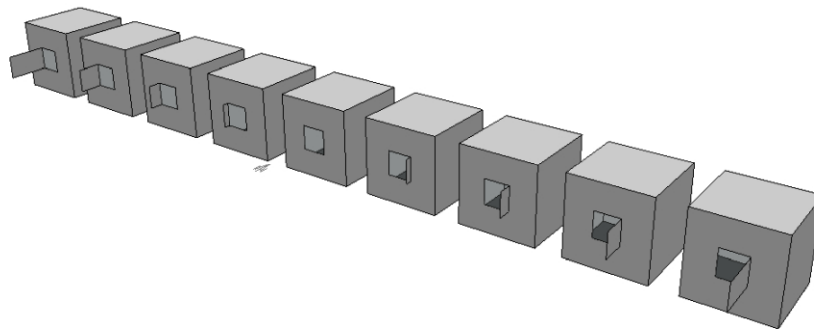
Al igual que en el caso de los voladizos, aunque la extensión idónea para asegurar un bloqueo de la radiación proveniente de las áreas de la bóveda celeste cubierta es infinita, se ha observado que la extensión mínima de los salientes es la altura de la ventana. Al reducir su extensión, la ventana se ve expuesta a áreas de la bóveda celeste con una alta y baja elevación solar ( $\gamma$ ), por lo que los valores resultantes en este estudio será mayores que con salientes de extensión infinita.

El modelo de referencia tiene la fachada acristalada orientada al Sur, es decir, la ventana tiene acceso a una porción de bóveda celeste con un azimuth que cubre el rango de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ . Para estudiar la obstrucción del saliente lateral se plantean los ángulos de obstrucción definidos para evaluar los voladizos ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ ) aplicados en el rango de valores de azimuth negativo (Este) y en el rango de valores de azimuth positivo (Oeste), partiendo de la no existencia de saliente lateral [Tabla 32].

Esta determinación da lugar a que cuando se estudia el ángulo de obstrucción con azimuth negativo el saliente se coloca en la jamba derecha de la ventana, y que cuando se estudia el ángulo de obstrucción con azimuth positivo el saliente se coloca en la jamba izquierda de la ventana, vista ésta desde el exterior [Figura 214].

N°	Obstrucción (°)	Ángulo de visión (°)	Profundidad (m)	Hemisferio obstruido	Rango azimut visible
1	60°	120°	1.65	Este	-30° a 90°
2	45°	135°	0.95	Este	-45° a 90°
3	30°	150°	0.55	Este	-60° a 90°
4	15°	165°	0.25	Este	-75° a 90°
5	0°	180°	0.00	-	-90° a 90°
6	15°	165°	0.25	Oeste	-90° a 75°
7	30°	150°	0.55	Oeste	-90° a 60°
8	45°	135°	0.95	Oeste	-90° a 45°
9	60°	120°	1.65	Oeste	-90° a 30°

Tabla 32: Ángulo de obstrucción de los salientes y valores de los parámetros afectados



### Dispositivos de lamas fijas

Los dispositivos de lamas fijas de estudio son el conjunto de elementos fijos que se colocan en el exterior del hueco, generalmente compuesto por elementos iguales distribuidos equitativamente sobre una superficie, pudiendo ser elementos horizontales, verticales o formando una retícula combinando elementos verticales y horizontales.

Mientras la definición de las lamas horizontales es similar a la de los voladizos, los aspectos implicados en la definición de las lamas verticales deben tener en cuenta otros aspectos. La definición de la retícula resulta de la combinación de la definición de los elementos horizontales y verticales que la componen. En todos los casos, las dimensiones de los elementos se igualan a las dimensiones de la ventana, se mantiene una profundidad de los elementos de 0'10 m, no se separan del plano de la ventana y el coeficiente de reflexión es de 50%.

En el caso de las lamas horizontales, considerando el modelo exento y que el rango máximo del ángulo de elevación ( $\gamma$ ) de la bóveda celeste visible es de 0° a 90°, se define el ángulo de obstrucción exactamente igual que con los voladizos, debido a la relación geométrica que guardan los elementos. El ángulo de obstrucción ( $\alpha$ ) de las lamas horizontales se mide desde el centro de la lama horizontal inferior, ya que ésta se convierte en el nuevo plano del horizonte, representando el ángulo de elevación 0°.

Una vez definido el ángulo de obstrucción ( $\alpha$ ), manteniendo la profundidad de los elementos, se obtiene la distancia ( $d$ ) [Figura 215] que deben guardar las lamas, lo que da lugar a la obtención del número de elementos que son necesarios para cubrir la altura del hueco.

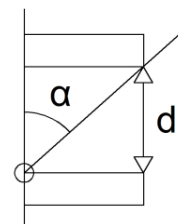


Figura 215: Definición del ángulo de obstrucción ( $\alpha$ ) y la distancia ( $d$ ) entre las lamas horizontales. P.M. Esquivias

A la hora de distribuir las lamas siempre se parte del dintel de la ventana, sin incorporar ningún elemento por debajo del alféizar de la misma, ya que el funcionamiento de las lamas horizontales se basa en la obstrucción de la parte superior de la bóveda celeste. En este caso se considera que la pérdida del posible aporte por reflexión sobre la lama inferior es despreciable [Figura 216].

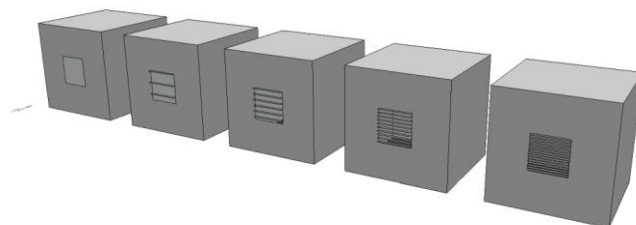


Figura 216: Representación gráfica de los modelos de lamas horizontales de la serie "Lamas Fijas" en *Ecotect*. P.M. Esquivias

En el caso de las lamas verticales, la presencia de elementos verticales distribuidos en la anchura del hueco supone la reducción del rango de azimut visible simultáneamente a ambos extremos de dicho rango. El ángulo de obstrucción de las lamas verticales se mide desde el punto opuesto a la lama, tal como se define el ángulo de obstrucción de los salientes laterales, sin embargo el rango de azimut de bóveda celeste visible por la ventana difiere al visible cuando se incorpora un saliente.

Al medir el ángulo de obstrucción en el punto opuesto a la lama, dicho punto en realidad sólo cuenta con una amplitud de rango de azimut visible de  $90^\circ$ , siendo el mismo ángulo de obstrucción tanto para los valores positivos como negativos del ángulos azimutales. La presencia de las lamas verticales hace que sólo entre luz solar directa en el rango de azimut no obstruido por las lamas, tanto al Este como al Oeste, considerando la fachada orientada al Sur.

Una vez definido el ángulo de obstrucción ( $\alpha$ ), manteniendo la profundidad de las lamas constante, se obtiene la distancia de separación que guardan los elementos ( $d$ ) [Figura 217], y de ahí el número de lamas necesarias para cubrir la anchura del hueco.

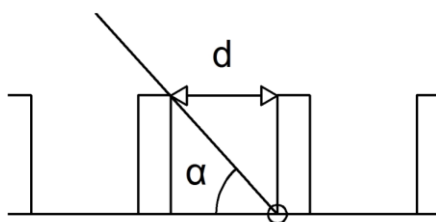


Figura 217: Definición del ángulo de obstrucción ( $\alpha$ ) y de la distancia ( $d$ ) entre las lamas verticales. P.M. Esquivias

En el caso de las lamas verticales, su distribución se realiza respecto al centro de la ventana, finalizando con la primera lama que sobrepasa la anchura de la ventana, ya que en este caso, todas las lamas representan un obstáculo del ángulo de azimut visible [Figura 218].

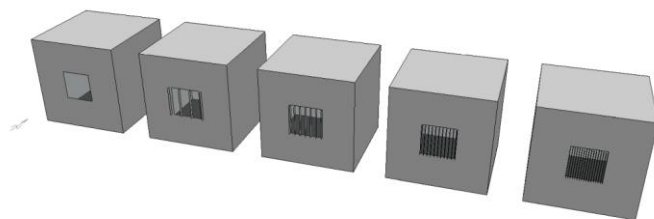


Figura 218: Representación gráfica de los modelos de lamas verticales de la serie "Lamas Fijas" en *Ecotect*. P.M. Esquivias

Por último, la presencia de elementos verticales y horizontales fijos formando una retícula se traduce en la combinación geométrica de los parámetros definidos para las lamas horizontales y las lamas verticales, afectando por tanto, simultáneamente al rango de ángulo de elevación ( $\gamma$ ) y de azimut ( $\alpha$ ) visible de la bóveda celeste. En este caso, aunque la distribución de los elementos horizontales comienza desde el dintel de la ventana, se cierra el número de lamas con la primera lama que se coloca por debajo del alféizar [Figura 219].

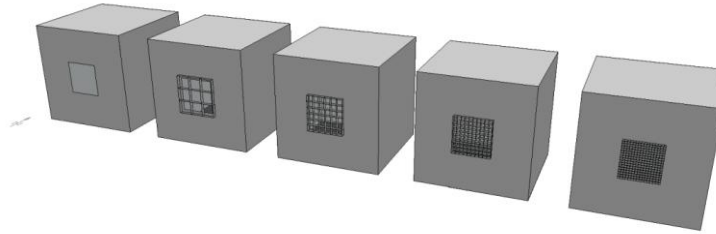


Figura 219: Representación gráfica de los modelos de retícula de la serie "Lamas Fijas" en Ecotect. P.M. Esquivias

En resumen, las diferentes configuraciones de lamas resultan en los modelos de cálculo con las características que se muestran en la Tabla 33:

N°	Ángulo obstruido (°)		Ángulo visible (°)		Rango visible		Separación (m)		N° Lamas	
	$\gamma$	$\alpha$	$\gamma$	$\alpha$	$\gamma$	$\alpha$	Horiz	Vertic	Horiz	Vertic
1	0°	0°	90°	180°	0° a 90°	-90° a 90°	<sup>SM</sup>	<sup>SM</sup>	0	0
2	15°	0°	75°	180°	0° a 75°	-90° a 90°	0.37	<sup>SM</sup>	3	0
3	30°	0°	60°	180°	0° a 60°	-90° a 90°	0.17	<sup>SM</sup>	6	0
4	45°	0°	45°	180°	0° a 45°	-90° a 90°	0.10	<sup>SM</sup>	10	0
5	60°	0°	30°	180°	0° a 30°	-90° a 90°	0.06	<sup>SM</sup>	17	0
6	0°	15°	90°	150°	0° a 90°	-75° a 75°	<sup>SM</sup>	0.37	0	4
7	0°	30°	90°	120°	0° a 90°	-60° a 60°	<sup>SM</sup>	0.17	0	7
8	0°	45°	90°	90°	0° a 90°	-45° a 45°	<sup>SM</sup>	0.10	0	11
9	0°	60°	90°	60°	0° a 90°	-30° a 30°	<sup>SM</sup>	0.06	0	18
10	15°	15°	75°	150°	0° a 75°	-75° a 75°	0.37	0.37	4	4
11	30°	30°	60°	120°	0° a 60°	-60° a 60°	0.17	0.17	7	7
12	45°	45°	45°	90°	0° a 45°	-45° a 45°	0.10	0.10	11	11
13	60°	60°	30°	60°	0° a 30°	-30° a 30°	0.06	0.06	18	18

Tabla 33: Dispositivos de lamas fijas: valores de estudio



## 3.2 Medios instrumentales

---

Una vez definidos el modelo de referencia y las variables a estudiar, se plantean varios medios instrumentales para la obtención de los datos que, tras su tratamiento, formarán los resultados de la investigación.

El desarrollo de esta investigación se ha realizado mediante la aplicación de diferentes programas informáticos con los que se han llevado a cabo una simulación de iluminación natural y una simulación energética de los modelos de cálculo y se han obtenido los datos necesarios para comenzar la evaluación de cada aspecto. También se ha contado con programas informáticos específicos para el tratamiento de los datos y la presentación de los resultados en un formato manejable y comprensible.

Para la selección del programa de simulación de iluminación natural se ha tenido en cuenta el motor y el método de cálculo, el modelo de cielo y el tipo de simulación que realiza o rango temporal en el que ejecuta el cálculo. Así también se ha tenido en cuenta su validación académica internacional y la disponibilidad del mismo en el momento de realizar la investigación, así como el tipo de resultados que arroja.

Del mismo modo, para la selección del programa de simulación energética se ha tenido en cuenta el motor y el método de cálculo, su validación internacional así como su accesibilidad dentro del grupo de investigación.

Otros programas utilizados en esta investigación representan al mismo tiempo un medio auxiliar como un medio de cálculo, algunos de ellos vienen marcados por la metodología propia de los programas de simulación y otros han visto superadas sus capacidades para el tratamiento de datos, dando lugar a la selección de otros medios auxiliares más versátiles y potentes.





### 3.2.1 Herramientas de simulación de iluminación natural

Aunque existen una gran cantidad de programas en uso, los algoritmos de cálculo de iluminación natural que utilizan se concentran en unos pocos. Actualmente, los más utilizados son el *trazado de rayos (raytracing)* y la *radiosidad (radiosity)* [167]. La obtención de datos de iluminancia se puede llevar a cabo utilizando programas específicos, entre los que destaca *Radiance* [76], aunque también se pueden utilizar programas de cálculo de iluminación artificial, de análisis energético [51] [89] o de diseño ambiental de los edificios [144], que incorporan módulos de cálculo de iluminación natural.

Normalmente el problema de utilizar estos programas cuyo principal objetivo no es el cálculo de la iluminación natural reside en que los módulos de cálculo que utilizan se basan en algoritmos simplificados, reduciendo su precisión [1].

Frente a la diversidad de programas de simulación validados, según los diferentes métodos aprobados por las instituciones correspondientes, es necesario conocer cuáles son sus prestaciones y cuáles se aproximan más a los objetivos de cálculo.

En el caso particular del desarrollo de esta tesis doctoral, es de importancia señalar cuál es el método de cálculo utilizado en los programas de simulación de iluminación natural, el modelo de cielo que incorpora así como el tipo de simulación que lleva a cabo, ya sea estática, es decir, cada simulación sólo contempla una situación «congelada» de cielo, o dinámica, en la que la simulación abarca todas las situaciones de cielo recogidas en el archivo climático de la localidad [Figura 220].

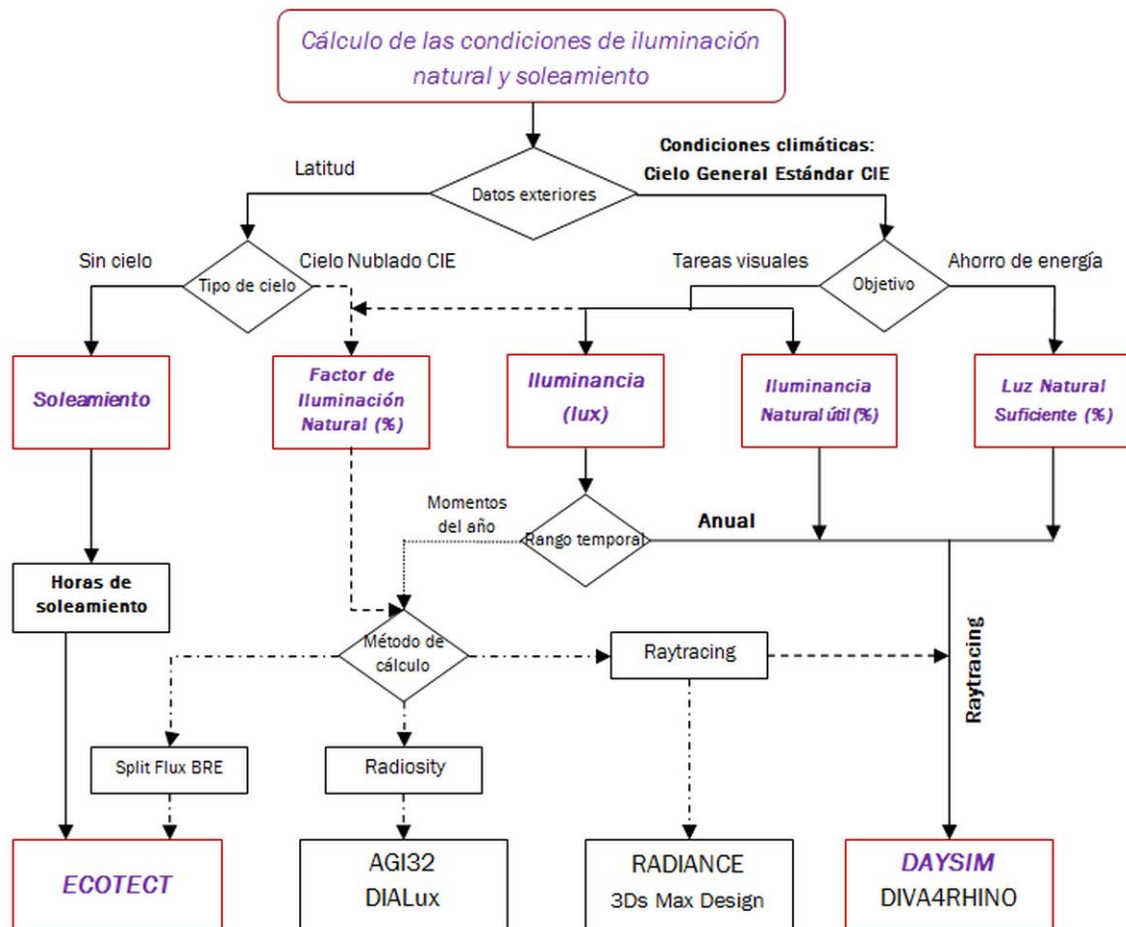


Figura 220: Características de algunos programas considerados para obtener los resultados de cálculo objeto del trabajo de investigación. P.M. Esquivias

En la siguiente tabla se muestran estos datos para los programas de simulación de iluminación natural de mayor presencia en el panorama internacional. En el contexto del desarrollo de este estudio, se opta por programas de simulación que consideren todas las condiciones de cielo, contempladas en el *Cielo General Estándar CIE* y permitan un cálculo dinámico de las condiciones de iluminación natural para poder obtener los valores de los diferentes indicadores dinámicos, además de los valores de *Factor de Iluminación Natural (DF)*, en el plano de trabajo.

Programa	Método	Modelo de cielo utilizado	Tipo de simulación
Radiance	Trazado de rayos	Cielo Nublado Estándar CIE	Estática
DAYSIM	Trazado de rayos	Cielo General Estándar CIE	Dinámica
AGi32	Radiosidad	Cielo General Estándar CIE	Estática
DIALux 4	Radiosidad	Cielo Nublado Estándar CIE	Estática
Mental ray: 3Ds Max Design	Trazado de rayos	Cielo General Estándar CIE	Estática
Autodesk Ecotect Analysis	Split Flux BRE	Cielo Nublado Estándar CIE	Estática
DIVA for Rhino	Trazado de rayos	Cielo General Estándar CIE	Dinámica

Tabla 34: Características de los programas de simulación de iluminación más habituales.

Tanto *DAYSIM* [88] como *DIVA-for-Rhino* [358] se ajustan a los requisitos necesarios para la obtención de los valores de iluminancia en cada sensor del plano de trabajo en cada etapa temporal marcada según las condiciones climáticas locales, reflejadas en el *archivo climático normalizado* de la localización. La elección entre ambos se ha basado en la disponibilidad del mismo, optando por *DAYSIM* debido a su gratuidad y libre difusión en la comunidad internacional y a que, gracias al convenio de *Autodesk* con la *Universidad de Sevilla*, se tiene acceso gratuito al programa *Autodesk Ecotect Analysis*.

*DAYSIM* es una herramienta de análisis de iluminación natural que está basada en el motor de cálculo *Radiance*. Creada en el año 2000 por *Instituto para la Investigación en la Construcción del Consejo Nacional de Investigación de Canadá (Institute for Research Construction-National Research Council Canada -IRC-NRC)*, el *Instituto Fraunhofer para la Física de la Edificación de Alemania (Fraunhofer Institute for Building Physics -IBPF)* y por la *Universidad de Harvard (USA)*, todo el proceso de desarrollo de *DAYSIM* ha sido coordinado por *Christoph F. Reinhart* desde 1998 [88].

*Radiance*, su motor de cálculo, utiliza el *trazado de rayos inverso (backward raytracing)* cuyos algoritmos se basan en fundamentos físicos y se utiliza internacionalmente para el análisis de iluminación siendo capaz de generar valores precisos de *radiancia/luminancia* ( $W/sr\ m^2$ ,  $cd/m^2$ ) e *irradiancia/iluminancia* ( $W/m^2$ , lux) [76] [97]. *Radiance* fue de los primeros programas en generar resultados de cálculo para un determinado punto de vista. Además, ha sido pionero en el desarrollo de algunas de las técnicas de cálculo disponibles en la mayoría de los programas de simulación de iluminación [252].

*Radiance* se creó como herramienta de investigación por el *Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley (National Lawrence Berkeley Laboratory -NLBL)* por Greg Ward [359] en 1988 con código abierto, por lo que es de libre disponibilidad. Precisamente el hecho de ser un programa de código abierto ha permitido su continua actualización debido a las contribuciones tanto desde el ámbito de la investigación como desde el ámbito de la informática.

El propósito de *Radiance* es predecir los niveles de iluminación y la apariencia de un espacio antes de su construcción. Se trata de un conjunto de programas que permiten crear y convertir los datos de entrada necesarios para la simulación en el lenguaje de *Radiance*, realizar la simulación de iluminación y generar los datos y las imágenes resultantes de la simulación.

Los datos de entrada se compilan en una estructura de árbol “octree”, que ha demostrado ser una estructura eficiente para el proceso del *trazado de rayos* (p.e. determinando qué superficie es

intersectada por un rayo). Para la simulación de iluminación, *Radiance* mezcla el *método estadístico de Monte Carlo* y la técnica determinista *backward raytracing* para obtener resultados bastante precisos en un tiempo razonable.

El proceso de cálculo consta de tres partes principales: el cálculo de la componente directa, de la componente especular indirecta y la componente difusa indirecta. Obtenidos estos valores, se ordenan para crear una imagen de calidad fotográfica [359].

La precisión de los cálculos de *Radiance* (en función de la mayor emisión de rayos, o de la consideración de un mayor número de reflexiones) viene determinada por los parámetros de simulación que describen la escena de cálculo. Estos parámetros se pueden implementar individualmente para cada simulación e indican a *Radiance* cómo realizar la simulación.

Los parámetros fundamentales en el *trazado de rayos* son [76]:

1. ab: “ambient bounces” (reflexiones ambientales). Define el número máximo de reflexiones difusas calculadas en el cálculo indirecto. Un valor de cero implica anular el cálculo de la componente indirecta.
2. ad: “ambient division” (división ambiental). Define el número de rayos que salen desde un punto de una superficie durante el cálculo de la componente indirecta. El error en el cálculo de Monte Carlo de la iluminancia indirecta será inversamente proporcional a la raíz cuadrada de este número. Un valor de cero implica anular el cálculo de la componente indirecta.
3. as: “ambient super-sampling” (supermuestreo ambiental). El supermuestreo sólo se aplica a la división ambiental que muestra un cambio significativo en los valores, para aumentar la definición de la delimitación del área diferente.
4. ar: “ambient resolution” (resolución ambiental). Este número determinará la densidad máxima de valores ambientales utilizados para la interpolación. El valor máximo viene dado por la siguiente relación: (maximum scene dimension x ambient accuracy) / ( ambient resolution)
5. aa: “ambient accuracy” (precisión ambiental). Este valor define el número de interpolaciones. Un valor de cero implica la ausencia de interpolación de valores.
6. lr: “limit reflection” (reflexión límite). Este valor limita el número de reflexiones si éste es positivo. Si es negativo o nulo entonces se utiliza una ruleta rusa para terminar las reflexiones del rayo si el peso límite del rayo es positivo. Si “lr” es negativo entonces representa el límite superior de reflexiones realizadas a partir de la cual se utiliza la ruleta rusa.
7. lw: “limit weight” (peso límite). Este valor limita el peso de cada rayo a un mínimo. Durante el trazado de rayos, se graba la contribución (peso) estimada que un rayo puede tener en la imagen final. Si este peso es menor que el valor mínimo y la reflexión límite es positiva, entonces no se traza el rayo. Por otro lado, la ruleta rusa se utiliza para continuar los rayos con una probabilidad igual al peso del rayo dividido por el valor dado.
8. st: “specular threshold” (umbral especular). Es la mínima fracción de reflexión o transmisión, bajo la cual no se realiza un muestreo especular. Un valor de cero significa que los reflejos siempre se muestrearán trazando rayos reflejados o transmitidos. Un valor de uno implica que nunca se utiliza el muestreo especular. Los reflejos provenientes de las fuentes de luz siempre se corregirán, pero las reflexiones provenientes de otras superficies se aproximarán

utilizando un valor ambiental. Un valor entre cero y uno ofrece un compromiso entre la precisión de la imagen y el tiempo de visualización.

9. sj: “specular jitter” (fluctuación especular). Es el grado en que los reflejos se muestrean para los materiales especulares rugosos. Un valor de uno significa que todos los reflejos se muestrearán completamente utilizando trazado de rayos distribuidos. Un valor de cero significa que no habrá fluctuación y todas las reflexiones aparecerán perfiladas incluso cuando debieran ser difusas.
10. dj: “direct jitter” (fluctuación directa). Un valor de cero muestrea cada fuente en puntos de muestra específicos, dando una visualización con menos variaciones diferenciales pero menos precisa. Un valor positivo provoca rayos que se distribuyen sobre cada fuente de muestra de acuerdo con su tamaño, dando lugar a penumbras más precisas. Esta opción nunca debe ser mayor de 1, y puede causar problemas cuando el valor es más pequeño.
11. ds: “direct sampling” (muestreo directo). Una fuente de luz se subdividirá hasta que la amplitud de cada área de muestra dividida por la distancia al punto iluminado es menor que este valor. Esto asegura la precisión en las regiones cercanas a fuentes de gran tamaño minimizando el tiempo de computación. Un valor de cero desactiva la subdivisión, mandando como mucho un rayo de sombra por cada fuente de luz.
12. dr: “direct relays” (transmisión directa). Define el número de reflexiones para las fuentes secundarias. Un valor de cero significa que se ignorarán las fuentes secundarias. Un valor de uno significa que las fuentes se convertirán en la primera generación de fuentes secundarias. Un valor de dos significa que la primera generación de fuentes secundarias también se convertirán en la segunda generación de fuentes secundarias, y así sucesivamente.
13. dp: “direct pretest density” (prueba previa de densidad directa). Es el número de muestras por estereorradián que se utilizará para predeterminar o no si vale la pena seguir los rayos de sombra a lo largo de todas las reflexiones y/o transmisiones asociadas a una trayectoria de una fuente secundaria. Un valor de cero significa que se comprobarán siempre todas las trayectorias de las fuentes secundarias para las sombras si se comprueba por completo.

Sus debilidades más destacables radican en que *Radiance* no cuenta con una interfaz de usuario propia, es un programa de líneas de comandos, y que, además, se requiere de un cierto grado de especialización para manejar sus variables [206]. Debido a esto, *Radiance* ha sido incorporado como motor de cálculo dentro de otras herramientas como *ADELINe* (*Fraunhofer Institute for Building Physics -IBPF*, sin soporte), *Desktop Radiance* (*Lawrence Berkeley National Laboratory -LBNL*, sin soporte), *Rayfront* (*Mischler*, sin soporte), *DAYSIM* (*Institute for Research Construction-National Research Council Canada -IRC-NRC*) [88] y *RadianceES* (*Integrated Environmental Solutions*) [97]. También ha sido incorporado a herramientas de simulación energética o medioambiental como *DesignBuilder*, *OpenStudio* o *Autodesk Ecotect Analysis* [136].

*DAYSIM*, al utilizar *Radiance* como motor de cálculo, utiliza los mismos parámetros de cálculo para realizar las simulaciones. Sin embargo establece dos conjuntos de parámetros preestablecidos en función de la precisión que se quiera alcanzar en la simulación: escena de complejidad 1 y escena de complejidad 2 [84].

La escena de complejidad 1 asume como objetivo principal el cálculo del perfil anual de iluminancias debido a la iluminación natural en un punto de referencia tras la ventana. Utilizando el *trazado inverso de rayos* la mayoría de los rayos no entrarían en la habitación de estudio. Esta situación, comenzando desde el punto de referencia, utilizando la simulación estándar de *Radiance*,

es más económica, temporalmente hablando. La escena de complejidad 2 se utiliza en los casos en los que existen elementos de protección solar móvil como las persianas venecianas.

A diferencia de *Radiance*, *DAYSIM* utiliza el concepto del *Coefficiente de Luz Natural* junto con el *Modelo de Cielo de Perez* para predecir la cantidad de luz natural dentro y alrededor de los edificios, en base a las irradiancias normal directa y difusa horizontal, tomadas de un *archivo climático normalizado* [Figura 221]. *DAYSIM* se desarrolló para calcular con mayor eficacia que *Radiance* series temporales de iluminancias o luminancias bajo condiciones cambiantes de cielo [84].

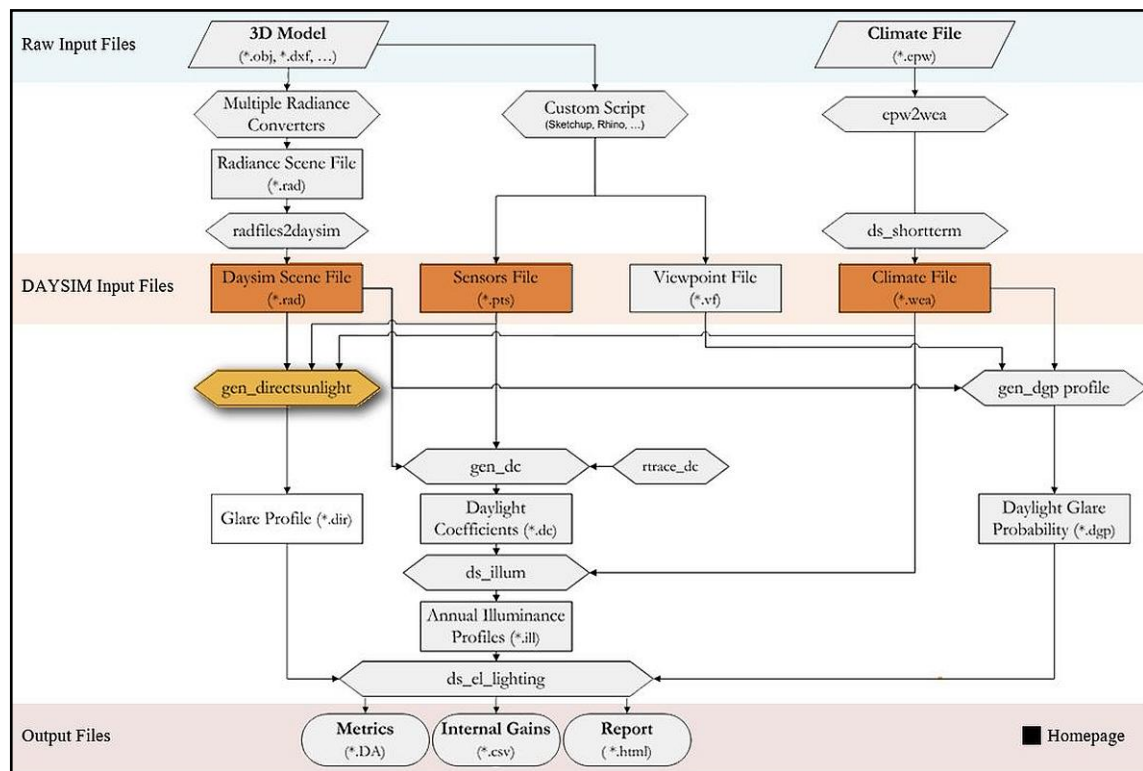


Figura 221: Subprogramas que componen la herramienta de cálculo *DAYSIM*[85].

Para realizar la simulación en *DAYSIM* normalmente se introduce el modelo tridimensional creado en otro programa, con vínculos de exportación a *DAYSIM*, como Autodesk Ecotect Analysis [84] o SketchUp, y se incorpora un archivo climático, validado por el USDOE [355].

Los resultados de la simulación abarcan desde el *Factor de Iluminación Natural (DF)* y los indicadores de iluminación basadas en el clima, como la *Autonomía de Luz Natural (DA)* y la *Iluminancia Natural Útil (UDI)*, al deslumbramiento anual y el consumo energético de la iluminación eléctrica. *DAYSIM* también genera horarios de ocupación, cargas de iluminación y la posición de los dispositivos de protección solar que pueden acoplarse directamente con motores de cálculo de simulación térmica como *EnergyPlus*, *eQuest* y *TRNSYS* [88] [136].

Los resultados de *DAYSIM* tienden a ser muy similares a los resultados de *Radiance*, especialmente bajo condiciones de cielo nublado. Bajo condiciones de cielo soleado los resultados pueden divergir, ya que *DAYSIM* interpola las contribuciones solares directas de las condiciones de cielo particulares con las cuatro condiciones representativas más próximas [160].

Junto con *Radiance*, ha sido validado bajo diferentes métodos para comprobar la precisión de los resultados: con mediciones reales y con pruebas analíticas, entre ellas las propuestas por la *CIE* [99], así como las propuestas por la *IRC-NRC* [160], obteniendo valoraciones positivas [68] [123].



### 3.2.2 Herramientas de simulación energética

Respecto a los programas de simulación energética, para obtener la cantidad de radiación solar térmica que entra en el espacio, el *método del Balance Térmico (HBM)* es, en opinión de la comunidad internacional, el método de cálculo más fiable, ya que permite obtener resultados más precisos que cualquier método simplificado. Además, si se combina con en *Método de las Series Temporales Radiantes (RSTM)*, se puede obtener información adicional sobre el comportamiento de cada componente interviniente en las ecuaciones de transferencia de calor.

El hecho de que calcule la radiación solar transmitida a través de las ventanas de forma separada, permite obtener de forma separada los resultados de ganancia solar térmica. Por eso los programas basados en *EnergyPlus* son los que más se adecuan al desarrollo de este trabajo de investigación.

De los programas más habituales, debido a sus características [Tabla 35], la salida de datos que ofrece y la disponibilidad del mismo en el seno del grupo de investigación *TEP-130*, se opta por *Energyplus* como motor de cálculo, a través de la interfaz *DesignBuilder* [86].

Programas	Método	Ganancia solar	Insolación
ESP-r	Balance térmico	Considera interreflexiones no especulares en el entorno exterior	Cálculo horario y cada etapa horaria
TRNSYS	Balance térmico	El interior muestra la reflexión de la radiación solar directa en el interior y el exterior Considera interreflexiones no especulares en el entorno exterior	Cálculo horario y cada etapa horaria Simulado fuera del programa que requiere información adicional. La radiación solar directa atraviesa las ventanas interiores
DOE-2	Factor de ponderación		Cálculo horario sobre las superficies, y cada etapa horaria para los elementos de sombra
EnergyPlus	Balance térmico	El interior muestra la reflexión de la radiación solar directa en el interior y el exterior Considera interreflexiones en el entorno exterior	Cálculo cada etapa horaria La radiación solar directa atraviesa las ventanas interiores Valores separados de conducción y radiación
Autodesk Ecotect Analysis	Exporta a EnergyPlus	El interior muestra la reflexión de la radiación solar directa en el interior y el exterior Considera interreflexiones en el entorno exterior	La radiación solar directa atraviesa las ventanas interiores Análisis de la radiación solar incidente en el espacio Genera diagramas solares Penetración de Sol y patrón de sombras en tiempo real.
DIVA for Rhino	Exporta a EnergyPlus	El interior muestra la reflexión de la radiación solar directa en el interior y el exterior Considera interreflexiones en el entorno exterior	La radiación solar directa atraviesa las ventanas interiores Análisis de la radiación solar incidente en el espacio

Tabla 35: Características de ganancia solar e insolación de algunos programas de cálculo.

*EnergyPlus* es el resultado de la combinación de las mejores características de los motores de cálculo *DOE-2* y *BLAST* [89], ambos escritos en *FORTTRAN* [360] [361]. Si bien *DOE-2* utiliza los factores de ponderación, *BLAST* utiliza el método del balance térmico para la determinación de las cargas térmicas, en base a los datos climáticos y los datos de entrada del usuario de las condiciones constructivas y operacionales [Figura 222]. Para cada hora simulada, *BLAST* obtiene un balance térmico para cada superficie de cada zona descrita y un balance térmico del aire de la habitación, en base a las ecuaciones termodinámicas.

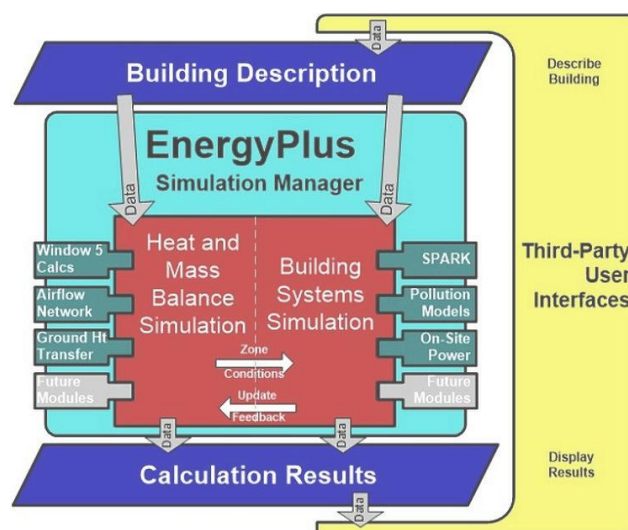


Figura 222: Esquema de funcionamiento de *EnergyPlus* [89].

*EnergyPlus* se basa en un enfoque integrado [360] que permite un cálculo más preciso de la temperatura de los espacios y por tanto en una mejor estimación de diferentes parámetros resultantes, como el confort térmico. El corazón de este programa se basa en el cálculo del balance térmico de *BLAST*, al cual se le añaden tres módulos basados en las capacidades de *DOE-2*: simulación de la iluminación natural, cálculo de los acristalamientos y un módulo de modelo de cielo [362] [363]. El *método del Balance Térmico* se combina en *EnergyPlus* con el *método de las Series Radiantes Temporales* para permitir el cálculo del sistema de climatización.

Cada versión de *EnergyPlus* ha probado su precisión mediante el '*ASHRAE Standard 140*' [162] y el *método BESTEST* de la *Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency -IEA)* [100]. *EnergyPlus* comprende un código estructurado modular y principalmente es un motor de cálculo, por lo que no tiene interfaz propia. Algunas de las interfaces existentes en el panorama actual son *COMFEM*, *DesignBuilder* [86], *DIVA for Rhino* [358], *OpenStudio* y *Simergy* [136].

Además de calcular la ganancia solar a través de los huecos, como carga térmica, *EnergyPlus* permite calcular la iluminación, cuyos algoritmos de cálculo se basan en los métodos de *radiosidad* y de *flujo dividido (Split flux method)* [363] [364] [365]. El empleo del *método del flujo dividido*, tal como se ha visto anteriormente, proporciona resultados imprecisos de iluminación natural.

Entre las muchas interfaces creadas para *EnergyPlus*, *DesignBuilder* [86] se considera la más avanzada en el panorama internacional, estando generalizado su uso en la comunidad científica y en la práctica profesional [136] [198] [366]. El objetivo principal de *DesignBuilder* es la comprobación del comportamiento energético del edificio, proporcionando datos sobre el consumo de combustibles en sistemas térmicos e iluminación artificial y confort térmico.

Como utiliza *EnergyPlus* como motor de cálculo, permite obtener las ganancias térmicas a través de los acristalamientos de forma detallada, según las «etapas de tiempo» consideradas, separando la carga correspondiente a la transmitancia de las ganancias solares debidas a la radiación solar directa.

Desde 2011 *DesignBuilder* incluye un módulo de cálculo de iluminación natural que permite calcular el *Factor de Iluminación Natural* y los valores de iluminancia utilizando el motor de cálculo *Radiance* que utiliza las propiedades de transmisión visible de los acristalamientos del modelo térmico para realizar el cálculo, por lo que no requiere de una entrada de datos adicional. *DesignBuilder* contempla seis conjuntos de valores para los parámetros de cálculo de *Radiance* vistos anteriormente que determinan el grado de precisión del cálculo [86].



### 3.2.3 Herramientas auxiliares

#### 3.2.3.1 Modelos de simulación y horas de soleamiento

La herramienta de simulación energética *DesignBuilder* es un programa autónomo, es decir, él mismo incorpora una interfaz gráfica para la creación del modelo tridimensional de simulación y la definición de sus características, otra de visualización, de cálculo y de simulación. Además, realiza automáticamente la exportación del modelo a *EnergyPlus*, lo calcula e importa los resultados para mostrarlos en su interfaz de visualización de resultados.

Sin embargo, la herramienta de simulación de iluminación natural *DAYSIM* requiere de otros programas para la creación de los modelos de simulación, los cuales se importan, se adecuan y se les especifica las condiciones de cálculo y los criterios de análisis de los resultados. Además, también requiere de otro programa para la visualización gráfica de los resultados obtenidos, por lo que *DAYSIM* puede decirse que es un programa rigurosamente de cálculo, siendo dependiente de otros programas para crear los modelos y mostrar gráficamente los resultados.

Como herramienta auxiliar de *DAYSIM* se utiliza el programa *Autodesk Ecotect Analysis*, cuyo vínculo con *DAYSIM* está más que reconocido, probado y validado por los desarrolladores de *DAYSIM* [84]. El programa original *Ecotect* fue escrito como una demostración de algunas ideas presentadas en la tesis doctoral de *Dr. Andrew Mash* en la *Escuela de Arquitectura y Bellas Artes de la Universidad de Australia Occidental* [105]. En 2011 fue adquirido por la empresa *Autodesk* que ha mantenido el concepto original sin apenas realizar modificaciones.

*Autodesk Ecotect Analysis -Ecotect* - es una herramienta de análisis medioambiental que permite la simulación y análisis de diferentes aspectos de un edificio, incluyendo el análisis térmico, análisis acústico, de radiación solar incidente, niveles de iluminación y diagramas de soleamiento, entre otros [68] [118] [170].

Para realizar la simulación de todos estos aspectos, *Ecotect* se compone de una colección de algoritmos que fueron originalmente desarrollados para el cálculo manual del comportamiento del edificio coordinados bajo una interfaz de usuario. Sin embargo, debido a la simplicidad de los algoritmos, los resultados que arrojan no suelen ser muy precisos.

El potencial de su interfaz gráfica de creación de modelos, muy similar a *AutoCAD*, la interoperabilidad con *AutoCAD* y *ArchiCAD*, las características de su herramienta de visualización y la salida gráfica de datos, bi o tridimensional hacen que este programa sirva como plataforma para crear los datos de entrada a herramientas de cálculo específicas como *Radiance* [76], *DAYSIM* [88], *Energyplus* [89] o *CattAcoustics*, entre otras, y proporciona herramientas de representación de los resultados realizados en dichos programas [150].

Pese a que es capaz de realizar la simulación de diferentes aspectos medioambientales del edificio, *Ecotect* presenta diversas limitaciones de cálculo. Las principales limitaciones en el cálculo de iluminación natural de este programa son que *Ecotect* no considera los archivos climáticos para la simulación de iluminación y que una gran parte de las reflexiones de la luz no se tienen en cuenta, debido al empleo del método del flujo dividido [72].

Sin embargo, la radiación solar incidente se calcula directamente a partir de la geometría del modelo y utilizando el registro horario de valores de radiación directa y difusa horizontal ( $W/m^2$ ) contenido en el archivo climático incorporado [105] [Figura 223]. En este sentido, la radiación solar incidente se refiere a la cantidad de energía que intersecta una superficie plana. No se ve afectada de ninguna manera por las propiedades superficiales de los materiales o por cualquier efecto

interno refractivo, por lo que sólo concierne a la radiación que alcanza una superficie. Las propiedades de los materiales sólo afectan a la cantidad de radiación absorbida y/o transmitida por la superficie [105].

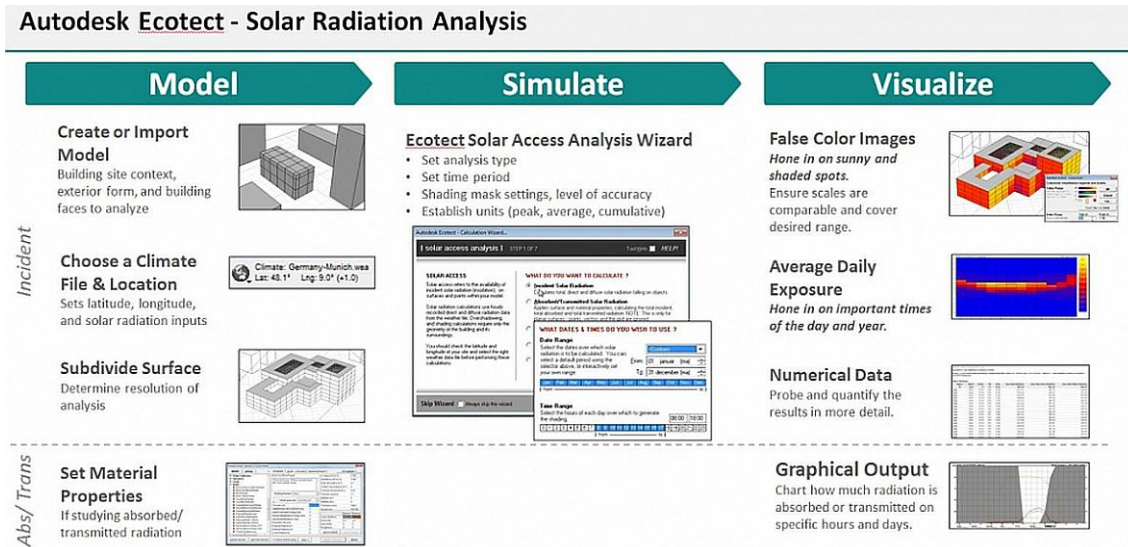


Figura 223: Módulo de análisis de radiación solar incidente de Ecotect

Además, debido a sus características gráficas, posee unas herramientas de análisis de soleamiento bastante potentes [Figura 224] incorporando todos los modelos de cartas solares reconocidos, así como incorporando interfaces de cálculo específicas, ya que uno de los objetivos de la concepción del programa era el cumplimiento normativo de las condiciones mínimas de iluminación natural y soleamiento, contempladas en la normativa británica.

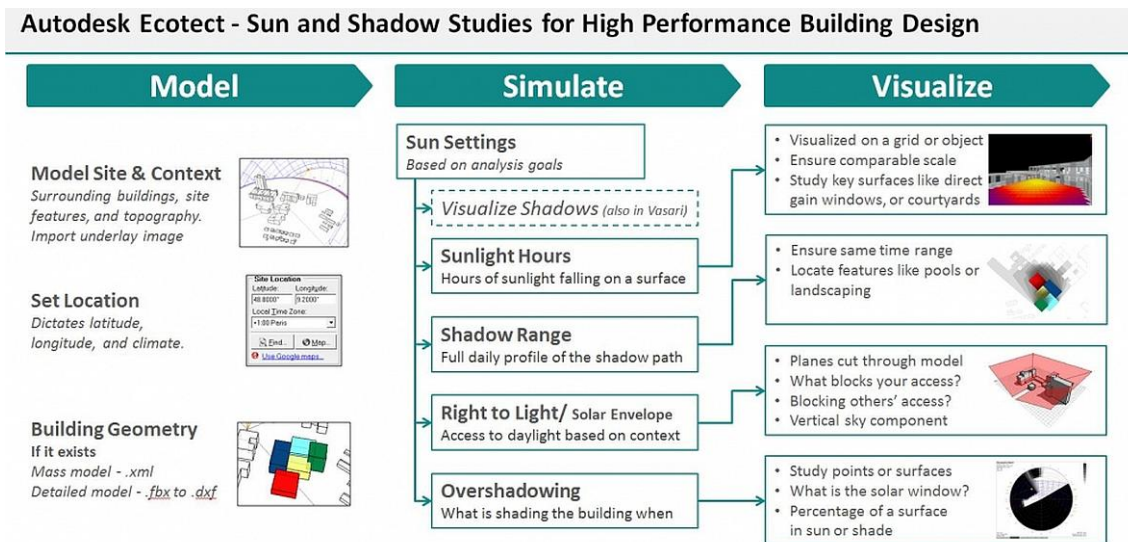


Figura 224: Módulo de análisis de soleamiento de Ecotect

En base a sus características, Ecotect actúa como herramienta auxiliar para la creación de los modelos de simulación para DAYSIM, pero también se utiliza para realizar algunos cálculos que arrojen información sobre las condiciones de soleamiento y de radiación solar incidente en el plano de trabajo.

### 3.2.3.2 Tratamiento estadístico de datos

Para el tratamiento estadístico de datos y la visualización de los resultados, obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en DAYSIM, DesignBuilder y Ecotect se utiliza MatLab (MATrix

*LABoratory*, «laboratorio de matrices»), disponible por convenio con la *Universidad de Sevilla*. *MatLab* es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) y servicio de especie.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

Fue creado por el matemático y programador de computadoras *Cleve Moler* en 1984, surgiendo la primera versión con la idea de emplear paquetes de subrutinas escritas en *FORTRAN* en los cursos de álgebra lineal y análisis numérico, sin necesidad de escribir programas en dicho lenguaje.

*MatLab* ofrece herramientas para adquirir, analizar y visualizar datos, lo que permite profundizar en los datos consumiendo menos tiempo que con el uso de hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como *Microsoft Excel*. También es posible documentar y compartir los resultados mediante gráficos e informes, o bien a través de la publicación de código de *MatLab*.

Este programa permite acceder a datos de archivos, otras aplicaciones, bases de datos y dispositivos externos. Es posible leer datos con formatos populares como el de *Microsoft Excel*, archivos de texto o binarios, archivos de imagen, sonido y vídeo, entre otros.

Mediante la creación de rutinas, es posible aplicar tratamiento estadístico a los datos y posteriormente expresarlos mediante gráficos, bi o tridimensionales de diferentes características [Figura 225], pudiendo ser personalizados de forma interactiva o mediante programación.

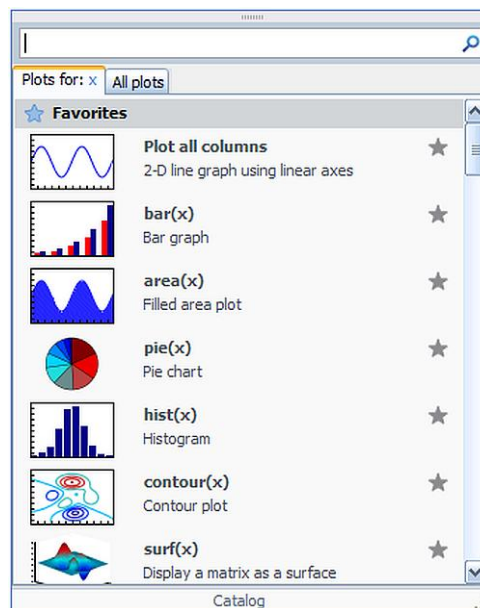


Figura 225: Catálogo de gráficas de resultados en *MatLab*

*MatLab*, por tanto, es la herramienta principal que se ha utilizado para el tratamiento de los datos obtenidos de las diferentes simulaciones y para la elaboración de las gráficas que muestran la distribución de resultados en un plano o en el tiempo. Para la creación de gráficas de análisis se ha utilizado *Microsoft Excel*.



### 3.2.4 Parámetros de cálculo de los programas de simulación

#### 3.2.4.1 DAYSIM

*DAYSIM* requiere como datos de entrada un archivo climático y un modelo tridimensional sobre el que realizar el cálculo. Los datos meteorológicos o bien puede ser un archivo climático con formato *DAYSIM*, de extensión «\*.wea», o bien puede utilizarse un archivo climático con formato *EnergyPlus*, de extensión «\*.epw», y ejecutar la conversión a «\*.wea» que incorpora el programa.

El modelo tridimensional debe ser importado de otros programas, permitiendo sólo la importación de archivos de *3D Studio* (\*.3ds), archivos de *Radiance* de extensión «\*.rif» o archivos de origen de *Radiance* que reflejan la materialidad del modelo (\*.mat) y su geometría (\*.rad). Uno de los procedimientos validados para crear el modelo tridimensional e importarlo a *DAYSIM* es a través de la definición geométrica y material del modelo en *Ecotect*.

Por tanto, utilizando *Ecotect* como antesala a la *simulación dinámica de iluminación natural*, se crea el modelo tridimensional, asignándole a cada elemento constructivo (suelo, paredes, techo y ventana) unas características materiales. Para ello, los desarrolladores de *DAYSIM* han creado una librería de materiales específicos (*Daysim\_Lighting\_Materials.lib*) que debe fijarse como librería de materiales global por defecto [Figura 226]. Así mismo debe establecerse el directorio de *DAYSIM* para la exportación de materiales.

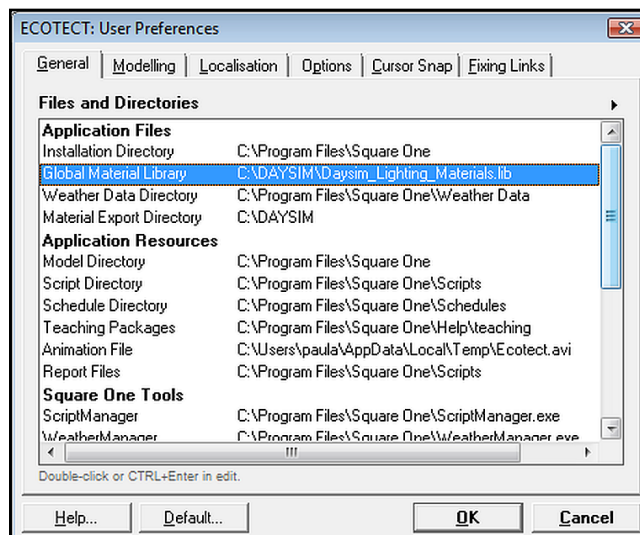


Figura 226: Incorporación de la librería de materiales y del directorio de exportación de materiales de *DAYSIM* para utilizar *Ecotect* como medio de entrada gráfica y material de *DAYSIM*

Una vez creado el modelo geométrico y asignados los materiales de la base de datos de *DAYSIM*, se crea el plano de trabajo especificando el número de sensores de análisis a través del panel «*Analysis Grid*» especificando los ejes del plano (XY) y su posición (0'80 m). A través del diálogo «*Grid Management*» se especifican las dimensiones del plano de cálculo, las coordenadas iniciales y el número de sensores en cada dirección (X, Y, Z). La posición X, Y, Z de cada sensor constituye en el proceso de exportación un archivo «\*.pts» necesario para representar en *Ecotect* los resultados de cálculo obtenidos en *DAYSIM*.

Con estos datos se procede a la exportación a través del diálogo «*Export Model Data*» para *Radiance/DAYSIM* que se encuentra en el panel «*Export Manager*» [Figura 227]. Se debe especificar en la salida de datos que se exporte el archivo en formato *DAYSIM Header* (\*.hea), el directorio donde se quiere que se guarde dicho archivo, que se nombren los archivos en formato

DOS 8.3 (sin espacios en la ruta), que se generen datos puntuales utilizando los sensores definidos para el plano de trabajo, que se incluyan las definiciones de los materiales y las compruebe.

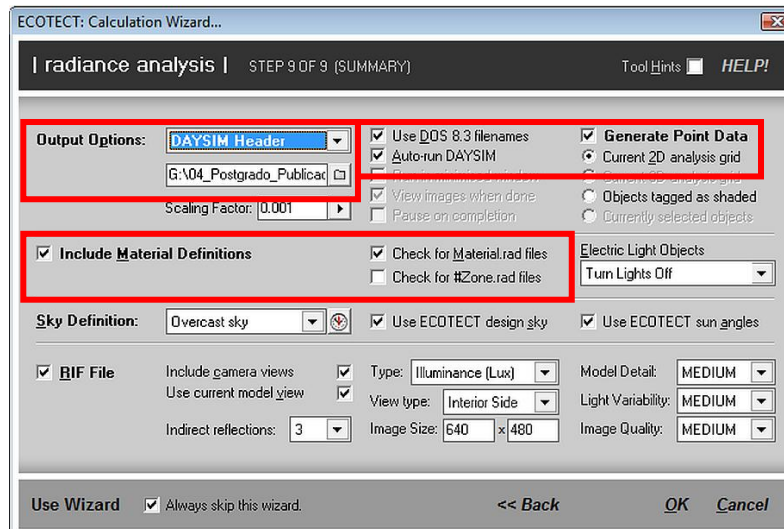


Figura 227: Parámetros de exportación a DAYSIM

Si el modelo en *Ecotect* no tiene vinculado un archivo climático, el proceso de exportación lo requerirá para su terminación. *Ecotect*, al igual que *DAYSIM*, trabaja con archivos climáticos de extensión «\*.wea», e incorpora un módulo de conversión de archivos climáticos, de forma que los datos meteorológicos necesarios en *DAYSIM* pueden también exportarse desde *Ecotect*.

Sin embargo, se ha comprobado que al importar el archivo climático «\*.wea» proveniente de *Ecotect*, los resultados de cálculo ofrecen datos horarios de iluminancia desde el 1 de Enero hasta el 30 de diciembre, es decir, la importación del archivo climático «\*.wea» de *Ecotect* no es completa y presenta fallos.

Por ello, una vez importada la geometría (\*.rad), la materialidad (\*.mat) y los puntos de cálculo (\*.pts) en *DAYSIM*, se procede a cargar el archivo climático de la localidad con extensión «\*.epw» y se ejecuta el módulo de conversión que incorpora *DAYSIM* para obtener los datos meteorológicos con extensión «\*.wea» (epw2wea.exe). Para la conversión de los datos se opta por una etapa temporal de 60 minutos y por defecto considera que los archivos climáticos «\*.epw» contienen información sobre irradiancia directa normal e irradiancia difusa horizontal.

Estando incorporados al programa los datos meteorológicos, además de la información del modelo tridimensional y los sensores de iluminación en el plano de trabajo se procede a realizar la simulación. *DAYSIM* utiliza *Radiance* como motor de cálculo, para lo cual deben especificarse los parámetros de simulación característicos de *Radiance* para poder ejecutarse. De las dos escenas de cálculo que propone *DAYSIM* para realizar el cálculo se opta por la escena de complejidad 2. Los valores de dicha escena para los parámetros de simulación son los siguientes:

Ambient bounces (ab)	7	Specular threshold (st)	0.1500
Ambient divisions (ad)	1500	Specular jitter (sj)	1.0000
Ambient super-samples (as)	100	Direct jitter (dj)	0.0000
Ambient resolution (ar)	300	Direct sampling (ds)	0.200
Ambient accuracy (aa)	0.1	Direct relays (dr)	2
Limit reflection (lr)	6	Direct pretest density (dp)	512
Limit weight (lw)	0.004000		

Tabla 36: parámetros de simulación de *Radiance*. Escena de complejidad 2

Con estos parámetros definidos se calculan los *Coeficientes de Luz Natural* (\*.dc) que describen la interacción de la luz del entorno con el edificio y luego se combinan con los datos contenidos en el archivo climático, dando lugar al *perfil anual de iluminancias horarias* (\*.ill).

Para obtener los datos analíticos que ofrece *DAYSIM* (*Factor de Iluminación Natural- DF*, *Autonomía de Luz Natural- DA*, *Iluminancia Natural Útil- UDI*, etc.) a partir de este *perfil anual de iluminancias* es necesario entrar en la pestaña de análisis donde es necesario definir un horario de ocupación, tipo de usuario y nivel mínimo de iluminación para obtener diferentes *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)*, así como especificar las características de la densidad de potencia instalada de iluminación artificial y las características del sistema de regulación para obtener el consumo energético, por ejemplo.

El cálculo del *Factor de Iluminación Natural* en *DAYSIM* se realiza considerando el *Cielo Nublado Estándar CIE* como un caso particular del *Cielo General Estándar CIE*, tan como se contempla en el documento «*CIE S 011:2003. Spatial distribution of Daylight - CIE Standard General Sky*» [87] y no depende de la modificación de estos valores dando como resultado un archivo «*\*daylight\_factor.DA*» que corresponde con el cálculo del *Factor de Iluminación Natural* basado en *Radiance* [84].

### 3.2.4.2 DesignBuilder

Los datos de *ganancias solares a través de los huecos exteriores* se obtienen mediante simulación energética de los modelos de cálculo utilizando el programa *DesignBuilder 2.2.4.001*, que trabaja con el motor de cálculo *EnergyPlus 4.0*.

Este programa se organiza mediante un sistema jerárquico de datos que se heredan en niveles inferiores formados a partir de librerías de componentes con los que se construyen las plantillas, que constituyen la fuente de datos por defecto del programa.

Estas plantillas se clasifican en diversas categorías, que corresponden con la diversa tipología de datos de entrada que necesita el programa para realizar la simulación energética: localización, región legislativa, condiciones operativas (ocupación, equipamiento, control ambiental, etc.), cerramientos, huecos, sistema de iluminación artificial y sistema de calefacción, ventilación y acondicionamiento del aire (Heating, ventilation & air conditioning -HVAC).

En esta investigación el objeto de estudio son las *ganancias solares a través de los huecos*, no el análisis energético de todos los elementos involucrados en el *balance térmico* del modelo, por lo que se han simplificado determinados datos de entrada, así como se han definido ciertas consideraciones de cálculo.

Como *DesignBuilder* es un programa diseñado para trabajar con *EnergyPlus*, la librería de plantillas y componentes se basan en datos reconocidos y utilizados internacionalmente. De esta forma, los datos climáticos de simulación que vienen incorporados en la plantilla de localización son los archivos climáticos «\*.epw» provenientes de la base de datos de *EnergyPlus* [355], por lo que no ha sido necesario crear ninguna plantilla al estar todos los archivos climáticos necesarios para el desarrollo de este trabajo ya incorporados en el programa.

La interfaz gráfica de *DesignBuilder* permite crear con facilidad modelos tridimensionales sencillos de cálculo. Si el modelo fuera de cierta complejidad se podría importar archivos «\*.dxf» como ayuda al dibujo. Al crear un modelo tridimensional debe considerarse que al completar la definición geométrica de la planta de un espacio, éste se considera por defecto en contacto con el exterior y con el suelo.

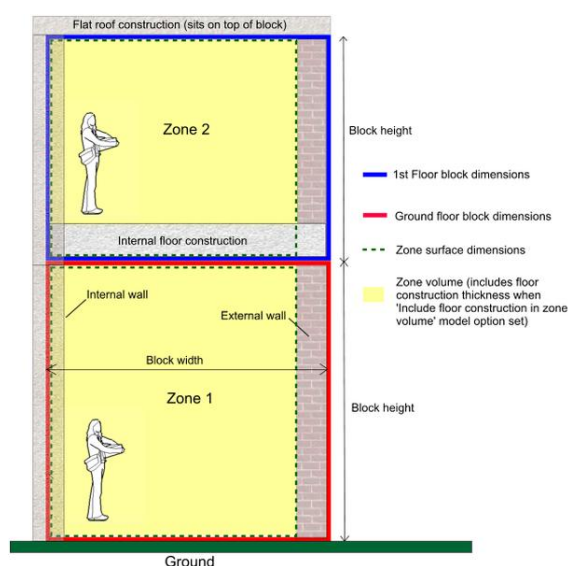


Figura 228: Consideraciones para la elaboración geométrica del modelo tridimensional en *DesignBuilder*.

Como el programa extruye hacia dentro el espesor de los cerramientos verticales, debe conocerse previamente el espesor del mismo, especialmente cuando el objetivo es tener unas determinadas dimensiones interiores. La altura del espacio comprende desde la cara inferior del suelo a la cara inferior del techo, salvo en la planta baja donde la altura a definir es la altura libre ya que los cerramientos horizontales se extruyen hacia fuera [Figura 228].

Mediante la plantilla de cerramientos se especifican las soluciones constructivas asociadas a cada elemento constructivo y se establecen las propiedades térmicas de éstas mediante la definición de su composición a través del número de capas, y el material de construcción (conductividad) y espesor de cada una de ellas.

De esta manera el programa calcula las propiedades térmicas de cada componente, incluyendo aspectos como el coeficiente de transmisión térmica (valor U) y los coeficientes de transferencia de calor (convectivo y radiante). Estas propiedades serán aplicadas en los procesos de cálculo y simulación para evaluar el funcionamiento energético del edificio.

Por tanto, conocido el valor de transmisión térmica límite de cada uno de los elementos constructivos [137] y definido el espesor de extrusión, es posible crear en el programa un material genérico cuya conductividad térmica dé como resultado de cálculo la transmitancia térmica deseada. Los cerramientos verticales y el techo se consideran en contacto con el exterior y el suelo en contacto con el terreno. Por defecto, se define una tasa de infiltración de aire de 0'7 ren/h.

Como punto de partida se considera el espacio vacío, sin actividad, ocupación, equipamientos ni control ambiental, para lo cual se toma la plantilla de actividad «*none*» ya definida en la librería del programa para reflejar esta situación. También se considera que no tiene ningún sistema activo de iluminación ni de acondicionamiento de aire ni de agua caliente sanitaria, por lo que en el panel de iluminación artificial se deja la plantilla que viene por defecto pero se desactivan todos los ítems para reflejar esta situación; así también en el panel de climatización, se aplica la plantilla de librería «*none*» que refleja la ausencia de cualquier tipo de sistema activo de aire acondicionado o de agua caliente sanitaria en el espacio.

En la pestaña de huecos se definen las características detalladas de las ventanas y otras superficies vidriadas incluidas en el modelo. El acristalamiento se caracteriza por el número de capas de las que se compone y las propiedades térmicas, solares y visibles y el espesor de cada una de ellas. Los datos incorporados a los modelos de simulación son los provenientes de la Base de datos Internacional de Acristalamiento, también incorporados a los datos de librería del programa. Los elementos de protección solar fijos también pueden definirse en *DesignBuilder* introduciendo la geometría de los mismos mediante la opción de sombra local.

Definidas las características geométricas, constructivas, operacionales y de los sistemas activos, se procede a realizar la simulación energética. En la ventana de opciones de cálculo se requiere la definición del rango temporal de simulación (del 1 de enero al 31 de diciembre), el intervalo



temporal de los resultados (horarios) y el número de cálculos a realizar por cada hora del archivo climático, del que se especifican 4 (cada 15 minutos).

Sobre la interacción de la geometría solar y las obstrucciones del entorno, se especifica que se incluyan todos los edificios del entorno para calcular las sombras sobre el modelo, que se consideren las reflexiones y las sombras que puede producir la radiación solar reflejada en el terreno y que se considere una distribución solar completa tanto en el interior como en el exterior para obtener una mayor precisión de la interacción solar.

Tras terminar la simulación se obtienen los resultados de las ganancias y pérdidas de calor a través de cada uno de los elementos involucrados en el *balance térmico* del modelo. El programa *Designbuilder* genera resultados que se visualizan dentro del propio programa, por lo que precisa de la exportación de resultados. Entre las diferentes opciones de visualización se encuentra el mostrar los resultados como una tabla de valores con intervalo horario. Estos valores pueden ser exportados como valores separados por comas al portapapeles [Figura 229].

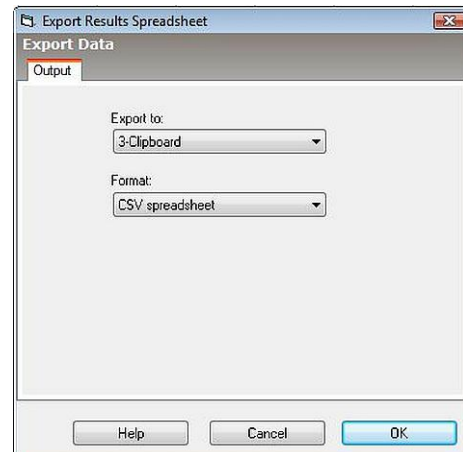


Figura 229: ventana de exportación como CSV.

Los resultados exportados tienen formato «\*.csv» por lo que se crea una hoja de cálculo llamada «DB» dentro de un libro de *Microsoft Excel*, guardado con el nombre del modelo para su mejor identificación, para recoger los resultados de la simulación energética del modelo de cálculo.

### 3.2.4.3 Autodesk Ecotect Analysis

Además de servir de interfaz gráfica para la creación del modelo tridimensional para *DAYSIM*, el programa de simulación *Autodesk Ecotect Analysis* también se utiliza para complementar los resultados obtenidos con *DAYSIM* y *DesignBuilder* con información cualitativa sobre la incidencia de la luz natural en el espacio.

La interfaz gráfica de *Ecotect* se organiza según páginas, paneles, menús de comandos y ventanas de diálogos, siendo la ordenación de páginas, paneles y menús consecuentes con el proceso de trabajo en el programa.

Al igual que en *DesignBuilder*, para la creación de un modelo es necesario, además de la creación del modelo geométrico dimensional, definir otros datos de entrada del modelo como las características de su localización, las condiciones operacionales de sus zonas térmicas, las propiedades materiales de los elementos constructivos, así como los detalles de visualización del modelo o los parámetros de cálculo para realizar diferentes tipos de análisis. Se exponen aquellos datos utilizados para el desarrollo de esta investigación.

Para exportar el modelo a *DAYSIM*, como se ha visto, sólo es necesaria la creación del modelo geométrico tridimensional, asignándole los materiales de la librería de iluminación de *DAYSIM* y la creación del plano de trabajo, cuyas celdas corresponden con el número de puntos de cálculo.

Para obtener las horas de soleamiento totales y la radiación solar incidente en el plano de trabajo, además, es necesaria la definición de la localización donde se ubica el modelo. Al igual que *DAYSIM*, *Ecotect* cuenta con un módulo de conversión de diferentes extensiones de archivos climáticos, entre los que se encuentra la extensión «\*.epw», a la extensión «\*.wea». La conversión de

los archivos climáticos *EnergyPlus* (\*.epw) a datos climáticos (\*.wea) viene ya tipificada y validada por lo que no se requiere la modificación de ningún dato en el proceso de conversión. Una vez obtenido el archivo climático «\*.wea» a partir del archivo «\*.epw», se introduce en el programa, fijando consigo la latitud, longitud y zona horaria (GMT).

Sobre el plano de trabajo, definido para trabajar con *DAYSIM*, *Ecotect* permite realizar diferentes tipos de cálculo: niveles de iluminación, niveles de insolación, confort espacial, y cuestiones relativas a *CFD*. La obtención de las horas de soleamiento y de la radiación solar incidente se lleva a cabo mediante el módulo de niveles de insolación o de análisis de acceso solar [Figura 230].

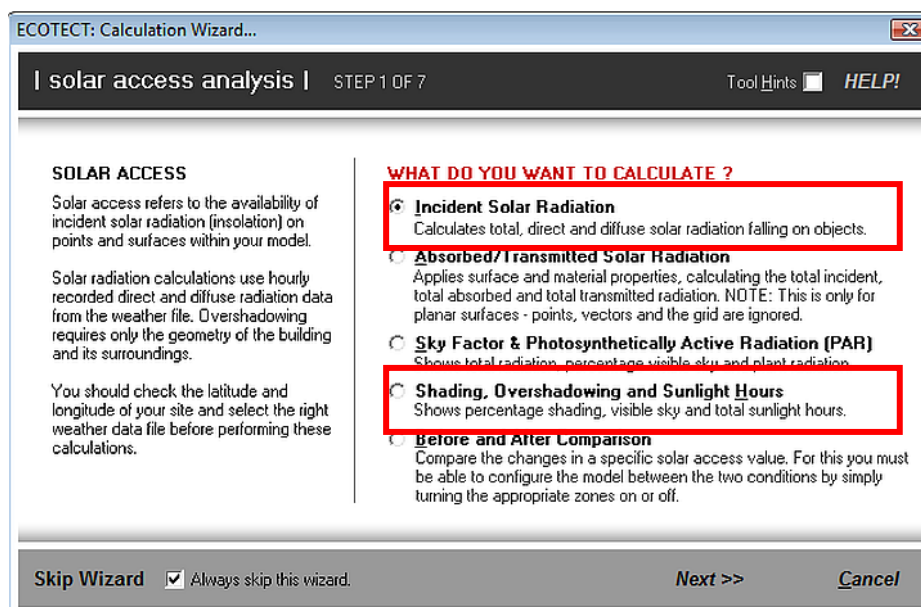


Figura 230: Módulo de análisis de la disponibilidad de radiación solar incidente o acceso solar

Para ambos cálculos es necesario definir el rango temporal sobre el que realizar el análisis (desde el 1 de enero al 31 de diciembre desde las 00:00 a las 23:59) así como definir la repercusión temporal de los resultados, pudiendo ser:

- Valores acumulados: suma de todos los valores obtenidos en el periodo de cálculo
- Valores medios diarios: suma de todos los valores obtenidos en el periodo de cálculo y dividido por el número de días del mismo
- Valores medios horarios: suma de todos los valores obtenidos en el periodo de cálculo y dividido por el número de horas del mismo
- Valores pico: valor máximo obtenido en el periodo de cálculo

Al ser un cálculo sobre la radiación solar incidente, es necesario también definir la precisión con que se van a considerar durante el cálculo la presencia de sombras, es decir, del soleamiento. Para ello, se establece una precisión alta del cálculo del soleamiento en cada punto del plano de trabajo a medida que se desarrolla el cálculo [Figura 231].

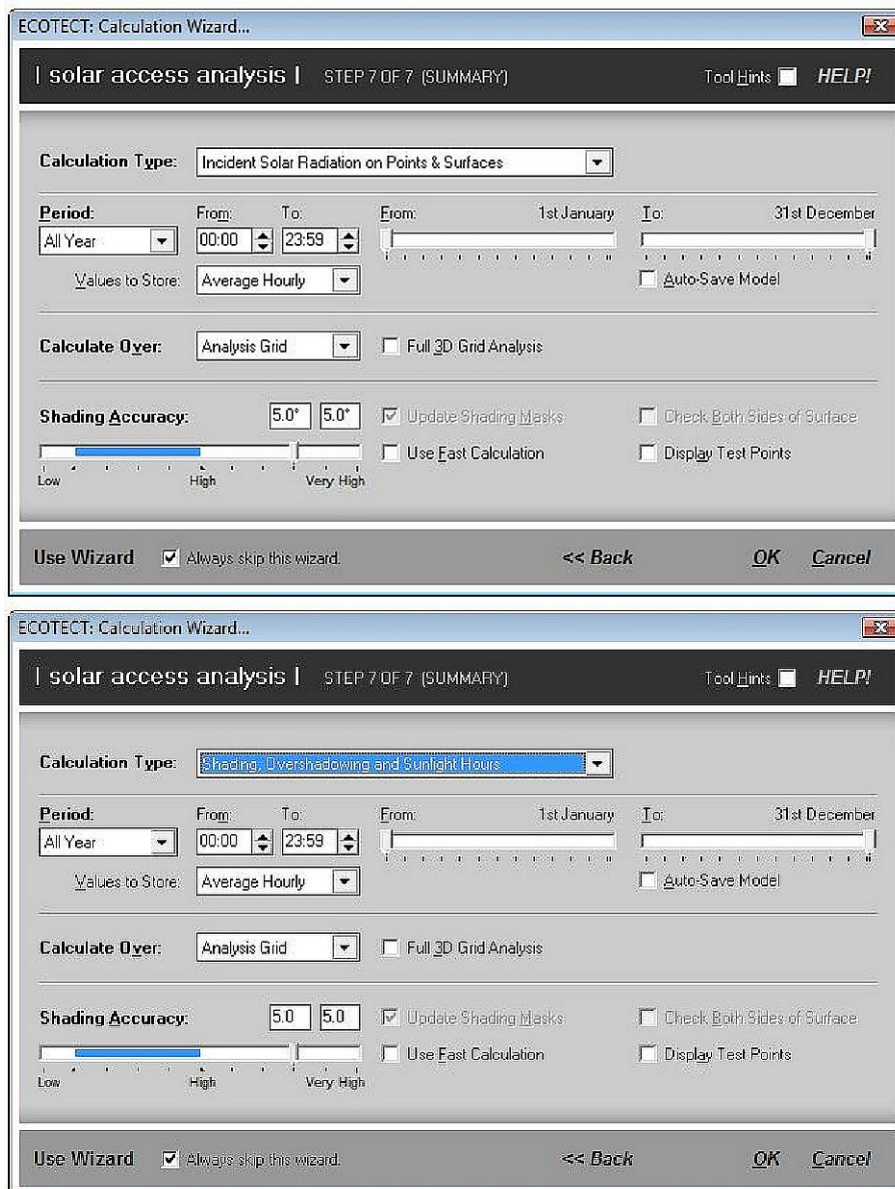


Figura 231: Parámetros de cálculo de la radiación solar incidente y las horas de soleamiento

Los resultados de cálculo se muestran en el plano de trabajo como un mapa de falso color del que se pueden modificar los valores mínimos y máximos a mostrar así como la escala gráfica empleada.

Sin embargo, para poder tratar estos datos o bien unificar la expresión gráfica, es posible exportar los datos de cálculo a través del gestor del plano de trabajo (*Grid management*) a un archivo de extensión «\*.txt» que contiene el mapa de valores mostrado en el programa, previo a la asignación de color.



### 3.3 Marco común de integración y comparación

Para evaluar las condiciones de iluminación se estudian los *niveles de iluminación* en diferentes puntos del plano de trabajo, expresados mediante indicadores de iluminación natural, complementados con las *horas de soleamiento*. La información térmica en la que se centra esta tesis es la *radiación solar* que entra en el espacio a través de la ventana, debido a la transparencia de la misma, más la reemitida al espacio, debido a la absortividad y emisividad de la misma. En los análisis energéticos de los edificios, esta información forma parte del estudio del comportamiento de la envolvente térmica, reflejada en forma de carga térmica de los espacios de estudio.

Para proporcionar una visión integradora de estos aspectos, que es uno de los objetivos de esta investigación es necesaria su comparación. Para poder comparar los datos es necesario que todos ellos representen las mismas condiciones de cálculo: la misma frecuencia temporal (anual, mensual, diaria, horaria o sub-horaria), las mismas magnitudes y, en la medida de lo posible, representen la misma unidad geométrica (punto, plano, espacio).

Sólo del conocimiento y comprensión del carácter, concepción y significado de cada dato primario e indicador existente de iluminación natural y de insolación es posible determinar cuáles son las bases que tienen en común y cuáles son los elementos que los diferencian. Si se modifican las bases de cálculo que los diferencian para establecer un valor común, se obtienen valores susceptibles de ser comparados.

La definición de este marco común de expresión de los datos primarios determina el primer nivel de tratamiento de datos, dando lugar a los datos descriptivos de las condiciones de iluminación natural e insolación del modelo de cálculo, así como al establecimiento de la forma en que estos datos van a ser expresados. Crear un marco común en el que puedan compararse datos de iluminación y de radiación térmica, analítica y gráficamente, bajo los mismos parámetros de cálculo, es, por tanto, fundamental para el desarrollo de esta investigación.

Los indicadores más habituales para expresar las condiciones de iluminación natural de un espacio, así como para expresar las ganancias térmicas por *radiación solar incidente* en el espacio son los siguientes:

- Iluminación Natural y Soleamiento
  - *Factor de Iluminación Natural (DF)*
  - *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural: Autonomía de Luz Natural (DA), Iluminancia Natural Útil (UDI), Exposición Solar Anual (ASE)* y otros, derivados de estos indicadores fundamentales.
- *Radiación Solar Térmica* a través del hueco
  - *Ganancia Solar Térmica a través del hueco (SHG)*

A la hora de tratar de comparar los diversos indicadores y su forma de expresión habitual, se pone de relieve que los diferentes indicadores se basan en conceptos distintos, por lo que, aunque se tomen los mismos datos de partida, no se expresan en términos comparables. En general, los grandes problemas encontrados a la hora de comparar los indicadores son los siguientes:

- Rango temporal: Salvo para el *Factor de Iluminación Natural* que no varía en el tiempo, los demás indicadores requieren de la determinación de un rango temporal sobre el que realizar el análisis de las condiciones ambientales interiores de cada sensor o zona de estudio. Los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural* se centran en las horas de

trabajo anuales; sin embargo, el análisis energético de un edificio se realiza considerando la totalidad del año. Es decir, no se está considerando el mismo rango temporal.

- Unidad dimensional de análisis: Debido a que el *Factor de Iluminación Natural* se fundamenta en una relación de iluminancias invariable en el tiempo se puede discretizar el porcentaje de puntos que guarda la misma relación, sabiendo que todos ellos alcanzan el mismo nivel de iluminación natural difusa simultáneamente, es decir, es un indicador que expresa el comportamiento del plano de trabajo. Sin embargo, cuando en cada sensor del plano de trabajo se muestra un *Indicador Dinámico de Iluminación Natural* en realidad se muestra el análisis estadístico de los valores horarios o sub-horarios de iluminancia obtenidos en cada punto, es decir, es un indicador que expresa el comportamiento de un punto. Por otro lado, la *Ganancia Solar*, así como otros flujos de calor que tienen lugar en la transferencia térmica de un edificio, muestra el valor total que afecta al espacio de estudio, es decir, es un indicador que expresa el comportamiento de un espacio.
- Magnitudes y unidades de medida: En el rango visible, la equivalente a la *Irradiancia* es la *Iluminancia*, que es el flujo luminoso (o potencia luminosa) incidente por unidad de superficie y se mide en lux (lumen/m<sup>2</sup>). La *irradiancia* infrarroja que entra en el espacio a través de una ventana, es decir, la potencia incidente en un espacio, es la *Ganancia Solar (SHG)* y se expresa en vatios (W). Sin embargo, en el ámbito lumínico, el *Factor de Iluminación Natural* viene expresado en porcentaje de iluminancia difusa exterior, y los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural* expresan porcentaje de horas. Para poder compararlos, éstos deben expresarse en los mismos términos, aunque cada uno de ellos presente un aspecto diferente del mismo fenómeno.

Para establecer una base común para la expresión de resultados, de forma que se traten los datos obtenidos de modo que muestren diferentes aspectos de un mismo modelo, es necesario conocer los puntos comunes y las diferencias de los indicadores [Tabla 37].

DF	DA	UDI	ASE	SHG
%	%	%	Horas (h)	KW
% iluminancia difusa exterior	% horas que se obtiene un valor mínimo de iluminación natural durante un determinado periodo	% horas que se obtiene un rango de valores de iluminación natural durante un determinado periodo	Nº horas totales que un punto del plano recibe luz solar directa durante un determinado periodo	Radiación solar transmitida directamente más la porción de radiación solar absorbida y reemitida al interior durante un determinado periodo: SHG=As I(g <sub>L</sub> )
1 Valor en cada sensor	1 Valor en cada sensor	1 Valor en cada sensor	1 Valor en cada sensor	1 Valor instantáneo en cada zona térmica
1 valor constante anual en cada sensor	4380 valores horarios de iluminancia natural en cada sensor	4380 valores horarios de iluminancia natural en cada sensor	Valor acumulado en el rango temporal	8760 valores horarios de ganancia solar a través de la ventana
Distribución de valores en un plano	Distribución de valores en un plano	Distribución de valores en un plano	Distribución de valores en un plano	Distribución de valores en el tiempo

Tabla 37: Características principales de los indicadores más habituales. SHG= ganancia solar térmica; As= superficie del hueco; I= irradiancia exterior total incidente; g<sub>L</sub>= factor solar del hueco.

Para facilitar la comprensión de los resultados de cálculo, éstos suelen venir expresados a través de diferentes indicadores, que se pueden definir como “una combinación matemática de mediciones y características que se expresan en una escala continua. El término indicador implica un

*ensamblaje más complejo de información que una simple medición directa, por lo que no puede ser determinado de forma inmediata en una campaña de medición” [1] [125].*

Tras la definición de un indicador se encuentra el establecimiento de unos determinados valores que expresan objetivamente un concepto. De esta forma, tras el indicador *Autonomía de Luz Natural (DA)* subyace el *criterio de Suficiente Luz Natural* para desarrollar una tarea visual durante la jornada laboral expresado cuantitativamente a través de la determinación de un nivel mínimo de iluminación obtenido exclusivamente por medios naturales y de la definición del horario de trabajo.

En esta investigación, se definen una serie de criterios conceptos que representan ciertos objetivos desde el punto de vista del confort del usuario y de la eficiencia energética del modelo, lo que da lugar a la creación de un conjunto de indicadores de las condiciones de iluminación natural e insolación, de forma que proporcionan una visión más global de la incidencia térmica y lumínica de la radiación solar que entra en el espacio a través de los huecos exteriores.





### 3.3.1 Rango temporal

En la definición de cada una de los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)* se considera un rango temporal sobre el que realizar el análisis de los valores de *iluminancia* obtenidos de la *Simulación Dinámica de Iluminación Natural (DDS)*. A la hora de tratar las series temporales anuales de iluminancias interiores, *Reinhart, Mardaljevic y Rogers* apuntan la necesidad de identificar el número, localización y orientación de los sensores, así como la necesidad de definir un rango temporal para los indicadores del rendimiento de la luz natural [13].

Centrándonos en los indicadores fundamentales para el desarrollo de este trabajo de investigación, éstos se definen de la siguiente manera:

- *Autonomía de Luz Natural (DA)*: porcentaje del periodo útil en el que el nivel mínimo de iluminación requerido en un punto se puede obtener sólo con luz natural.
- *Iluminancia Natural Útil (UDI)*: porcentaje del periodo útil en el que un punto tiene un nivel de iluminación por debajo de un valor mínimo, por encima del un valor máximo, que puede dar lugar a problemas de deslumbramiento y discomfort térmico, y en un rango de iluminancias que se considera útil para el desarrollo de las tareas visuales.
- *Exposición Solar Anual (ASE)*: número de horas útiles en el que un punto recibe luz solar directa.

*Reinhart, Mardaljevic y Rogers* apuntan como dos posibles opciones de rango temporal (a) las horas diurnas a lo largo del año o (b) las horas de ocupación anuales para una zona dada del edificio. Como argumento a favor de las horas de ocupación señalan que normalmente cuando un edificio cambia de función se abren o cierran ventanas como parte del proceso de adaptación, aunque esta acción es raramente aplicable ya que afecta a la imagen exterior del edificio. Además, argumentan que la consideración de las horas de ocupación supone incorporar las necesidades humanas en el acondicionamiento lumínico, cuestión que ya se aborda en los estudios energéticos mediante los perfiles de ocupación en los programas de simulación energética [13].

Sin embargo también consideran argumentos a favor de la utilización de las horas diurnas como rango temporal ya que son inherentes a la localización del edificio. La cantidad de horas diurnas anuales no cambian a menos que cambien las condiciones del entorno y no se ven afectadas por los perfiles de ocupación, por lo que es el rango adecuado para el diseño de un edificio sostenible a largo plazo [13].

Finalmente los desarrolladores de los indicadores optaron por establecer como rango temporal las horas diurnas anuales de ocupación, es decir, el rango temporal en que las personas necesitan unos determinados niveles de iluminación para el desarrollo de las tareas visuales. Este periodo de ocupación de un espacio está intrínsecamente vinculado al establecimiento de un patrón de ocupación. Sin embargo, cabe señalar varias cuestiones fundamentales sobre los mismos:

1. Un patrón de ocupación no es más que la normalización del comportamiento humano y lo normal en el comportamiento humano es la anormalidad: no es habitual que se repita el mismo comportamiento cada día. Mientras que este patrón puede acercarse bastante a la realidad en edificios cuya actividad se desarrolle en un horario fijo establecido, no es posible ser aplicado en espacios en los que se desarrollan actividades no regladas, como por ejemplo en una vivienda.
2. Los patrones de ocupación son uniformes y homogéneos y no reflejan la singularidad. Dentro de una actividad reglada por un horario fijo se producen alteraciones a lo largo del

año y según cada individuo. Los horarios de oficina, por ejemplo, se amoldan a lo largo del año a la presencia de periodos de vacaciones y de días festivos, entre otros.

Además, debido a cuestiones personales como la conciliación de la vida laboral y familiar, o la distribución de los periodos de descanso de los trabajadores se producen variaciones sobre dicho periodo de ocupación, especialmente si el número de personas que incurren en estas circunstancias es relevante en la ocupación del espacio.

3. Los patrones de ocupación no son de aplicación universal. Considerando otra vez el ejemplo de un espacio de oficina, con un horario diario establecido de comienzo y fin de la ocupación del espacio, este horario de apertura y cierre difiere según el país en que nos ubiquemos.

Así en las regiones de Europa y Estados Unidos con latitudes medias y altas, con relativamente poca disponibilidad de luz natural durante el invierno, sus horarios de trabajo son continuos con descansos muy breves tratando de aprovechar las horas de luz. Sin embargo, en las regiones del Sur de Europa, por citar un caso, al tener una mayor homogeneidad en la disponibilidad de luz natural, los horarios de trabajo se parten en turnos de mañana y tarde, dando lugar a descansos de mayor extensión para el almuerzo.

4. Un patrón de ocupación está asociado a la actividad que se desarrolla en el espacio. Pero a lo largo de la vida útil de un edificio, éste puede sufrir modificaciones que supongan el cambio de actividad a la que se destinan sus espacios [13]. Si la nueva actividad tiene un horario de ocupación diferente, ya no es aplicable el estudio de iluminación natural realizado.

Es más, cuando se está gestando un nuevo edificio, a menos que el promotor lo tenga muy claro, no es posible predecir cómo se va a ocupar el edificio y en qué horario, cayendo otra vez en el riesgo de aplicar un patrón de ocupación inadecuado en el estudio de iluminación natural que inhabilite la aplicación de los resultados obtenidos.

En base a estas cuestiones es posible plantearse que el análisis de las condiciones de iluminación natural considerando las horas en que el espacio está ocupado no muestra el potencial de iluminación natural del espacio sino el potencial de ahorro de energía eléctrica [13]. *“Para conocer el potencial de iluminación natural que tiene un espacio, como consecuencia de su diseño arquitectónico, es necesario considerar todo el tiempo en que es posible que haya luz natural en el espacio, sin depender de un factor tan arbitrario como las horas de trabajo, que puede cambiar incluso antes de que el edificio terminado entre en funcionamiento”* [50].

Dicho potencial «intrínseco» de iluminación natural de un espacio, por tanto, se determina a partir de la consideración de la máxima disponibilidad de luz natural en el exterior del edificio. A lo largo del año cualquier punto sobre la faz de la Tierra recibe radiación solar durante la mitad del año, distribuida en base a la consecución de periodos de luz y de oscuridad, de extensión variable según la ubicación y el momento del año.

La máxima disponibilidad temporal de luz natural exterior es la suma de las horas diurnas que tienen lugar durante el año, que asciende a un total de 4380 horas al año, que se establece en este trabajo como rango temporal de análisis de iluminancia y de ganancia solar a través de los huecos para la obtención de los resultados de investigación. De esta forma, todos los datos primarios se han calculado para un rango temporal de 8760 horas, de las cuales han sido discriminadas las horas nocturnas por no haber presencia de iluminación natural.

### 3.3.2 Unidad dimensional de análisis

Suponiendo que la luz viaja en línea recta, ésta se caracteriza por su direccionalidad y por su intensidad. La direccionalidad de la luz hace que la obtención de la distribución de los valores de iluminancia sobre un plano sea la unidad dimensional más importante en el ámbito lumínico para realizar el análisis de las condiciones de iluminación, ya sea natural o artificial.

El plano de análisis es el conocido plano de trabajo, formado generalmente por un conjunto de puntos de estudio o sensores localizados a 0'80 m del suelo, mirando hacia arriba para detectar la iluminancia que reciben por encima de dicho plano, de forma que sea útil para el desarrollo de la mayoría de las tareas visuales.

Cuando se realiza el cálculo del *Factor de Iluminación Natural (DF)*, se obtiene un valor por cada punto del plano de trabajo, pero *DF* representa una situación permanente en el tiempo al no ser más que una proporción de iluminancia difusa de la total horizontal difusa exterior, por lo que la relación permanece constante. Esta invariabilidad permite, una vez obtenidos los valores de *DF* para cada uno de los sensores del plano de trabajo, extraer información estadística sobre dicho conjunto de valores así como establecer criterios de análisis sobre la iluminación natural del plano de trabajo como una unidad de forma que se obtenga la «cobertura» de la luz natural o el porcentaje del plano de trabajo que alcanza unos determinados requisitos de iluminación.

Al trabajar con los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)*, el concepto de «cobertura» no sólo considera requisitos cuantitativos de iluminancia sino también su mantenimiento o variabilidad en el tiempo. Además, tal como apunta *J. Mardaljevic* [110], *“la principal deficiencia de los perfiles anuales de iluminación natural es que cada punto de cálculo se trata independientemente”*. De hecho, para obtener esta «cobertura» los valores horarios de iluminancia en cada sensor del plano de trabajo pueden analizarse en base a sus componentes [125]:

1. Para un determinado momento, cuántos sensores simultáneamente alcanzan un determinado valor de iluminancia
2. Para un determinado sensor, cuántas horas alcanza un determinado valor de iluminancia.

El primer enfoque es esencialmente un análisis instantáneo de todos los sensores de forma que se pueden extraer valores estadísticos de todo el plano de trabajo como un elemento unitario en cada hora. Podría decirse que es una generalización del procedimiento de análisis de la distribución de valores *DF* en el plano de trabajo, ya que para determinar el nivel de iluminación natural utilizando el concepto de *DF* es necesario conocer la *iluminancia horizontal exterior difusa* en un momento determinado del año. Indirectamente los valores *DF* muestran una situación instantánea a la cual se le realiza un análisis estadístico.

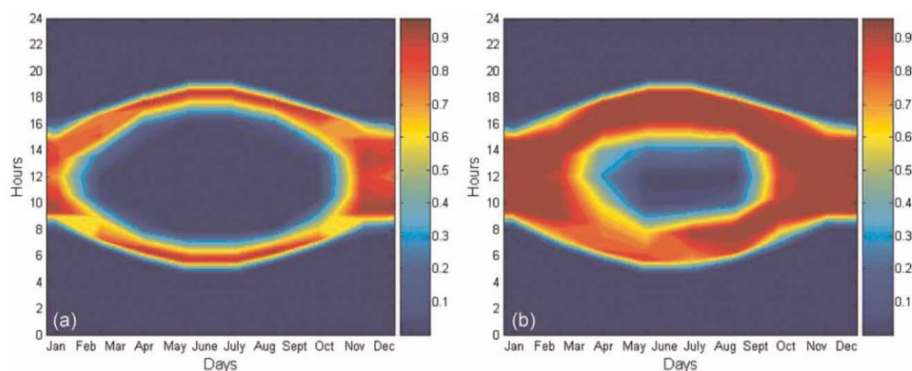


Figura 232: Mapas temporales del análisis estadístico instantáneo de los sensores del plano de trabajo [367].

Esta información se puede resumir en un valor horario del plano de trabajo y presentarse como un mapa temporal [Figura 232], como el propuesto por *Maryline Andersen* [367] para mostrar las variaciones en el plano de trabajo de dos propuestas arquitectónicas. Mientras este enfoque permite mostrar cuándo se alcanzan los objetivos de iluminación, no es fácil mostrar cuáles son los sensores que lo consiguen, es decir, se pierde la zonificación, que es esencial en el diseño arquitectónico.

Bajo el segundo enfoque, que es el adoptado por los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural*, sin embargo, se suman los resultados horarios a lo largo del año para cada sensor, por lo que se muestra una distribución de valores en el plano de trabajo, así como isolíneas, que representan el porcentaje del tiempo de análisis.

De esta forma se conserva la información geométrica, pudiendo proporcionar valores temporales o espaciales. Sin embargo, la gran diferencia es que mediante el análisis puntual las condiciones de iluminación no tienen lugar simultáneamente, ya que es más bien la suma anual separada por cada punto [125].

El plano de trabajo, por tanto, se convierte en el contenedor de un conjunto de puntos desvinculados, en vez de ser una unidad. Dicho de otra forma, con los valores puntuales obtenidos con los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural*, es imposible saber durante cuántas horas todos los puntos del plano alcanzan simultáneamente un determinado valor de iluminancia.

Ante esta situación, tal como expresa *Mardaljevic*: “*Si el objetivo final es obtener las zonas del plano de trabajo con un determinado Indicador Dinámico de Iluminación Natural, se debería calcular las zonas en que se tiene simultáneamente un determinado valor de dicho indicador, para obtener una visión global del plano de trabajo como un elemento unitario, no como la agregación de puntos*” [110] [128].

Partiendo como base del procedimiento de análisis espacio-temporal utilizado con la distribución de valores de *DF* en el plano de trabajo, se propone el análisis instantáneo de los sensores como el procedimiento que permite obtener información de la iluminación natural del plano de trabajo considerado como un elemento unitario.

Si consideramos las *ganancias solares térmicas a través de las ventanas*, éstas tienen como unidad dimensional de medida el espacio de estudio sobre el que actúan como carga térmica. La *ganancia solar térmica* expresada en vatios representa la entrada total de calor a través de la ventana. Podría plantearse la obtención de la repercusión de dicho valor sobre la superficie del plano de trabajo, pero efectuar dicha operación supondría la distribución homogénea de dicha radiación sobre el plano, lo cual no corresponde con la realidad: no muestra la direccionalidad de la radiación solar ni cómo incide en el plano de trabajo formando las manchas solares.

### 3.3.3 Criterios de Iluminación natural e insolación

A la hora de realizar análisis comparativos entre diferentes casos, en el ámbito de la iluminación natural se recurre a la aplicación de criterios de análisis para los diferentes indicadores. Los criterios de análisis permiten valorar la idoneidad de una determinada solución para alcanzar unos determinados objetivos. Bajo la aplicación de estos criterios de análisis se podrá establecer el margen de variación posible de cada uno de los parámetros estudiados, de forma que también sirva como medio para descartar determinados valores de cada parámetro y ser de mayor aplicabilidad a las primeras fases del diseño arquitectónico.

Tradicionalmente en el ámbito de la iluminación natural el objetivo cuantitativo es obtener un cierto nivel de iluminación en una determinada superficie del plano de trabajo. A partir de la definición de ambos valores, como umbrales mínimos para el confort visual, se obtiene, por ejemplo, el requisito de 2% de *Factor de Iluminación Natural (DF)* en, al menos, el 50% del plano de trabajo. Con la posibilidad de obtener series temporales de iluminancia y, con ellas, los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)*, se introduce un nuevo elemento para definir las condiciones mínimas de iluminación natural: la componente temporal, es decir, conseguir esas condiciones de iluminación durante un determinado periodo de tiempo.

Por otro lado, en el ámbito térmico, mientras la normativa establece unos valores límites para la demanda energética de los edificios, no hay límites establecidos sobre cada uno de los contribuyentes de la demanda, se especifican las características límites de transmitancia o factor solar de los elementos de la envolvente térmica, pero no al flujo de calor, por conducción o por radiación, que se produce a través de los mismos.

Para poder valorar la contribución de las ganancias solares a través de las ventanas exteriores es necesario, sin embargo, definir algún valor que sirva como criterio de análisis. Se sabe que la insolación excesiva provoca situaciones de sobrecalentamiento y deslumbramiento, pero no se tiene información sobre la relación de un defecto de insolación con las condiciones de iluminación, por lo que se plantea el establecimiento de un valor máximo de ganancias solares a través de las ventanas que permita evaluar, analizar y comparar los diferentes modelos.

#### 3.3.3.1 Suficiente Luz Natural

Los criterios de análisis marcan los objetivos a conseguir. En el caso de la iluminación natural, considerando su variabilidad temporal y su direccionalidad, cabría preguntarse: ¿cuál sería el valor de iluminancia aceptable para considerar que un espacio está iluminado naturalmente?, ¿durante cuánto tiempo debe alcanzarse dicho nivel de iluminación?, ¿qué porción del plano de trabajo con dicho nivel de iluminación es suficiente?

Actualmente la respuesta a estas preguntas es lo que da lugar a la *Suficiencia de Iluminación Natural de un espacio (Daylight sufficiency -DS)* [125]. En base a diversos estudios, un *nivel de iluminación de 300 lux* puede definirse como el nivel de iluminación mínimo a conseguir para llevar a cabo las tareas visuales más comunes. Este límite de iluminancia se encuentra además en concordancia con algunas normativas y recomendaciones [224].

El trabajo realizado para el proyecto de investigación '*Daylight metrics*' [125] financiado por la *Comisión de Energía de California*, coordinado por *L. Heschong* y guiado por el comité de la *IESNA* sobre Indicadores de Luz Natural (*IES Daylight Metrics Committee*), acordó utilizar el *50% del tiempo como límite temporal* para considerar un espacio iluminado naturalmente.

Al definir el valor mínimo de iluminancia y de tiempo, se puede obtener el porcentaje del plano de trabajo que cumple dichos requisitos y a partir de ahí establecer si un espacio se puede considerar iluminado naturalmente, que es básicamente lo que propone la *Autonomía Espacial de Luz Natural (Spatial Daylight Autonomy -sDA)* [126].

Con la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)*, la obtención del área del espacio que tiene 300 lux o más durante al menos el 50% del tiempo es inmediata mediante el cálculo del número de sensores del plano de trabajo cuyo valor de *Autonomía de Luz Natural* a 300 lux ( $DA_{300}$ ) es igual o mayor a 50 %horas.

El concepto del *Factor de Iluminación Natural (DF)* lleva implícito la componente temporal en la selección del valor de iluminancia horizontal exterior difusa ( $E_{h,d}$ ). Este valor puede obtenerse de diagramas, tablas o bien de los datos recogidos en los archivos climáticos.

Mediante el análisis estadístico de estos datos [50] [Figura 198, pág.234] puede determinarse cuál es el valor de iluminancia horizontal exterior difusa que se alcanza durante al menos el 50% del periodo considerado ( $E_{h,d\ med}$ ) [ver Anexo A], en este caso las 4380 horas diurnas. Con el valor de  $E_{h,d\ med}$  y el valor de iluminancia interior ( $E_{t,d}$ ) de 300 lux se obtiene el valor mínimo de *Factor de Iluminación Natural en base climática (Climate based Daylight Factor- DF<sub>cb</sub>)* [Tabla 38] que asegura el requisito de iluminación alcanzado durante un determinado periodo de tiempo [224]:

$$DF_{cb} = ( E_{t,d} / E_{h,d\ med} ) \times 100 = ( 300 \text{ lux} / E_{h,d\ med} ) \times 100$$

Ecuación 25: Factor de Iluminación Natural en base climática

Nº	País	Ciudad	WMO Estación	Köppen	Latitud (°)	$E_{h,d\ med}$ (lux)	$DF_{cb\ min}$
1	ICL	REYKJAVIK	40300	Cfc	64,13	11400	2,63
2	NOR	OSLO	14880	Dfb	59,90	12300	2,44
3	RUS	MOSCOW	276120	Dfb	55,75	14700	2,04
4	POL	WARSAW	123750	Cfb	52,17	14600	2,05
5	UKR	KIEV	333450	Dfb	50,40	17400	1,72
6	FRA	PARIS	71490	Cfb	48,73	15800	1,90
7	B&H	BANJA LUKA	132420	Cfb	44,78	17000	1,76
8	ROM	BUCHAREST	154200	Dfa	44,50	18100	1,66
9	SPA	SANTANDER	080230	Cfb	43,47	17400	1,72
10	ITA	ROME	162420	Csa	41,80	19100	1,56
11	SPA	BARCELONA	081810	Csa	41,28	18500	1,62
12	SPA	MADRID	082210	Csa	40,45	16800	1,79
13	SPA	PALMA	083060	Csa	39,55	18900	1,59
14	SPA	VALENCIA	082840	Csa	39,50	17400	1,72
15	PRT	LISBON	85360	Csa	38,73	18200	1,65
16	SPA	SEVILLE	83910	Csa	37,42	19000	1,58
17	SYR	DAMASCUS	400800	Bsh	33,42	17300	1,73
18	ISR	JERUSALEM	401840	Csa	31,78	17400	1,72

Tabla 38: Valor mínimo de  $DF_{cb\ min}$  para cada localización de estudio.

Con estos valores mínimos de  $DF_{cb\ min}$  es posible determinar qué porcentaje del plano de trabajo alcanza o supera el valor correspondiente según la localización de estudio.

Se define entonces la *Suficiencia de Iluminación Natural Difusa (Diffuse Daylight Sufficiency -DSd)* como el porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente 300 lux durante el 50% de las horas diurnas mediante exclusivamente la componente difusa de la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.

El *criterio de Suficiente Luz Natural* del tiempo puede aplicarse a los indicadores de disponibilidad de luz natural, que se basan en la determinación de un solo valor de iluminancia límite, como el *Factor de Iluminación Natural* (indirectamente) o la *Autonomía de Luz Natural* [368], sin embargo no es posible aplicarlo al esquema de la *Iluminancia Natural Útil (UDI)*.

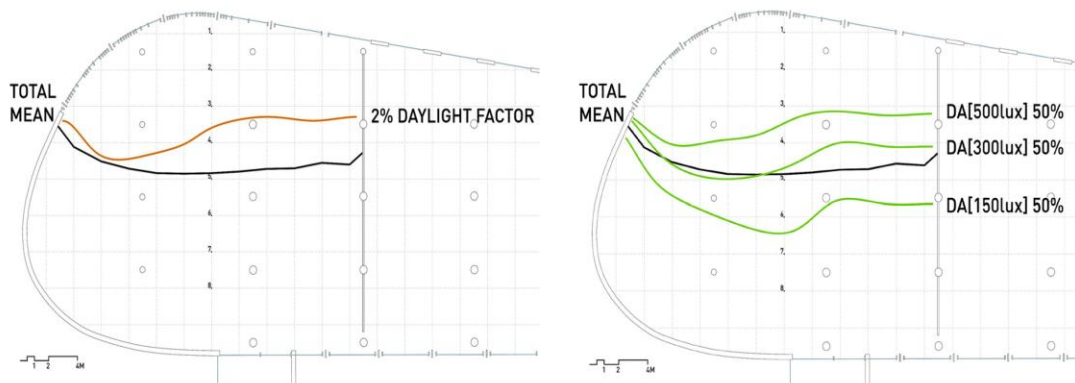


Figura 233: Límite promedio experimental de suficiencia en comparación con el criterio de 2% DF y con la *Autonomía de Luz Natural* del 50% para unos valores mínimos de iluminancia de 150, 300 y 500 lux [368].

### 3.3.3.2 Rango de iluminancias útiles según las tareas visuales

En el caso del indicador *Iluminancia Natural Útil (UDI)*, la definición de tres grupos de iluminancias fue un paso más allá de la *Autonomía de Luz Natural (DA)* y cualificó en cierto modo los análisis de las series temporales en cada punto. Sin embargo, el ojo humano tiene una gran capacidad de adaptación a las condiciones de iluminación de su entorno, lo cual dificulta el establecimiento de los niveles de iluminación más adecuados para el desarrollo de las diferentes tareas visuales [Figura 234].



Figura 234: Correlación entre tareas visuales y niveles de iluminación. *CENTC 169*.

Existe un amplio rango de condiciones de iluminación en las que el ojo humano rinde de forma satisfactoria, y existe un amplio rango de variación entre individuos, tal que compromete estas condiciones satisfactorias. Mientras no hay estudios concluyentes que correlacionen la provisión de luz natural, la satisfacción del ocupante con las condiciones ambientales y la productividad del trabajador, hay evidencias de que los trabajadores aprecian las oficinas que cuentan con luz natural y vistas del exterior, y que los espacios que no provocan situaciones de deslumbramiento y

térmicamente confortables tienen efectos cuantificables sobre la satisfacción y el rendimiento de los trabajadores [130] [369].

La norma '*UNE -EN 12464*' [231] recomienda un nivel de iluminación de diseño para los espacios de oficinas de 500 lux, valor normalmente utilizado en el mundo desarrollado. Conforme a esto, la iluminación artificial se diseña normalmente para proporcionar 500 lux de iluminancia (artificial) de forma uniforme en el plano de trabajo.

Sin embargo, se evidencia en el proyecto de investigación de campo '*Cost-Effective Open Plan Environment (COPE)*', llevado a cabo por el *Instituto para la Investigación en Construcción (Consejo Nacional de Investigación de Canadá -NRC)* que niveles de iluminación mayores o iguales a 150 lux se consideraban una «iluminación natural apreciable» [129].

Además, la *Sociedad de Ingenieros de Iluminación de Norte América (IESNA)* recomienda un rango general de iluminación de 50-100 lux directamente en el área de trabajo individual para trabajar con pantallas de ordenador. También se ha observado que las personas tienden a tolerar niveles de iluminación natural mucho más bajos que con luz artificial, particularmente en las reducidas condiciones de luz natural del final del día, continuando con la lectura a niveles tan bajos como 50 lux.

Los estudios relacionados con las impresiones de los trabajadores con las condiciones de iluminación indican que la mayoría de los empleados prefieren trabajar bajo cualquier forma de iluminación natural. Mientras que es muy complicado establecer la relación entre la iluminación natural y la satisfacción del ocupante, es un hecho que niveles bajos de iluminación natural pueden complementarse fácilmente con iluminación artificial mientras que la presencia de altos niveles de iluminación natural se asocian con problemas que son más complejos de resolver [5].

El rango útil establecido en el concepto de *Iluminancia Natural Útil* de 100 lux a 3000 lux se basa en estudios de campo sobre las preferencias de niveles de iluminación y abarca desde el desarrollo de tareas visuales sencillas a tareas visuales de gran precisión, conforme a lo indicado en la norma UNE [231].

Aunque parece que la subdivisión del rango útil en el rango de iluminancia suplementaria (100-300 lux) y el rango de iluminancia autónoma (300-3000 lux) es un hecho, éste último aún representa un rango muy amplio de iluminancias.

Para una mayor comprensión de la distribución cuantitativa y temporal de las iluminancias, de forma que realmente sean útiles, se debería crear una nueva subdivisión que muestre los rangos representativos de las diferentes tareas visuales.

A partir de la segregación de los rangos de iluminancia para la determinación de los UDI en función de la complejidad de las tareas visuales según los datos que describen la porción del plano de trabajo que se encuentra en cada uno de estos sub-rangos, se pueden obtener conclusiones sobre la idoneidad de dicho espacio para el desarrollo de determinadas tareas visuales o bien, teniendo fijada la tarea visual a desarrollar, se procedería a maximizar el porcentaje del plano de trabajo que se encuentra en el rango de iluminancias correspondiente.

Para establecer la subdivisión de los valores de iluminancias se parte de la relación entre los niveles de iluminancia y las tareas visuales, establecida por el *Comité Técnico 169 del Comité Europeo de Normalización (CENTC 169)*, así como de los niveles de iluminación que se requieren para el desarrollo de diferentes tareas visuales, tal como se describe en la norma '*UNE -EN 12464*' [231]. De esta forma se proponen los siguientes rangos de *Iluminancia Natural Útil* para el desarrollo de diversas tareas visuales:



Rango	Exigencia visual	Descripción del espacio
0 a 100 lux	0 a 25%	Áreas de circulación o que sean objeto de visitas cortas. Locales de ocupación no habitual. Tareas visuales confinadas al movimiento y una pequeña percepción de detalles.
100 a 300 lux	25 a 40%	Tareas con bajo nivel de precisión: percepción ocasional de detalles. Interiores continuamente ocupados, con tareas visuales sin percepción de detalles. Salones y salas de espera, vestuarios y cuartos de baño, almacenes, etc
300 a 500 lux	40 a 50%	Tareas con un nivel de precisión medio. Interiores continuamente ocupados, con tareas visuales sencillas (detalles grandes o con contraste). Archivo, copias, mostrador de recepción, taquillas, conserjería
500 a 3000 lux	50 a 75%	Tareas con altos niveles de precisión Interiores con tareas visuales difíciles, indispensable fina distinción de detalles. Interiores con actividades que exijan una distinción extremadamente fina o bajo condiciones de contraste extremadamente difíciles. Escritura, lectura, tratamiento de datos, trabajo CAD, salas de conferencias, cocinas, control de calidad, inspección
>3000 lux	75 a 100%	Tareas con niveles de precisión muy altos: operaciones quirúrgicas, relojería Interiores con actividades que exijan una distinción extremadamente fina o bajo condiciones de contraste extremadamente difíciles. Relojería, grabados, operaciones quirúrgicas

Tabla 39: Rangos de iluminación y tareas visuales

### 3.3.3.3 Irradiancia límite

Respecto a las *ganancias solares a través de las ventanas*, la falta de información sobre valores que proporcionen información sobre la falta o exceso de *radiación solar* en un espacio hace más compleja la determinación de un criterio de análisis. Para vincular la *ganancia solar térmica a través de las ventanas* con las condiciones de iluminación natural en el plano de trabajo es necesario, por tanto, establecer un medio de conexión.

Se sabe que ante la entrada de una excesiva cantidad de calor en el espacio los usuarios reaccionan, normalmente, interactuando con los dispositivos de sombra móviles, es decir, bloqueando la entrada de *radiación solar* en el espacio. Existen diversos estudios experimentales cuyo objetivo es la determinación de las condiciones ambientales bajo las cuales los ocupantes de un espacio, generalmente en oficinas, dejarán su puesto de trabajo para modificar la posición de dichos dispositivos móviles [332] [341] [370] [371]. En estos trabajos se relaciona el grado de obstrucción a la entrada de *radiación solar directa* con niveles de iluminación tanto interiores como exteriores, así como con la entrada de *ganancias solares* o la *radiación solar* en los huecos, entre otros factores.

Van Den Wymelenberg [332] muestra una revisión bastante completa y resumida de estos trabajos. El autor encontró sólo tres estudios que medían datos de *irradiación* para el cierre de las persianas manuales: uno de ellos no especificaba la localización de medición, otro medía la *irradiación vertical interior* pero sin especificar las propiedades del vidrio y otro medía la *irradiación horizontal* en la cubierta. También encontró un estudio con datos de *irradiación vertical exterior* para el control manual de cierres motorizados y otro donde se indicaban valores de *iluminancia vertical*, equivalente a una *irradiación* de  $370 \text{ W/m}^2$ . Además, un estudio sobre sistemas automatizados

indicaba un valor de *iluminancia vertical exterior*, equivalente a  $450 \text{ W/m}^2$ , a partir del cual se cierran habitualmente las persianas.

Como resumen de la relación entre la *irradiancia vertical* y la necesidad de bloquear la entrada de *radiación solar* en el espacio se señalan los siguientes valores:

- Soleamiento directo vertical, normal a la fachada Sur, entre  $125$  y  $300 \text{ W/m}^2$ . Este rango depende del *azimut* (*Littlefair*).
- Deslumbramiento de cielo empieza con una *irradiación vertical exterior* entre  $100$  y  $250 \text{ W/m}^2$  (*Gugliermetti y Bisegna*).
- Las persianas manuales permanecen abiertas con una *irradiancia vertical interior*, normal al vidrio, menor de  $58 \text{ W/m}^2$  (*Inoue*), y aumenta drásticamente su cierre con valores mayores de  $94.5 \text{ W/m}^2$  (*Selkowitz*), entre  $100$  y  $325 \text{ W/m}^2$  (*Inoue*) o entre  $150$  y  $200 \text{ W/m}^2$  (*Mahdavi*).
- A partir de una *irradiación solar* de  $300 \text{ W/m}^2$  (*Faber*) los ocupantes empiezan a interactuar con las persianas.
- Para una *radiación solar directa* más allá de  $50 \text{ W/m}^2$ , el cierre de persianas es proporcional a la penetración solar en la habitación (*Inoue*).
- 50% probabilidad de cierre de persianas con una *irradiancia vertical* en la ventana mayor de  $13 \text{ W/m}^2$  (*Inkarojrit*).
- En edificios sin aire acondicionado, las persianas se cierran con una *irradiancia vertical* mayor de  $150 \text{ W/m}^2$  (*Goller*).

Como se puede observar, existe una gran disparidad de valores sobre la relación entre la *irradiancia vertical* y la propensión del usuario a cerrar las persianas. Esto se debe a que:

- Las personas tienden a aceptar con mayor probabilidad las persianas abiertas que cerradas.
- Las personas tienden a cerrar manualmente las persianas durante el día para bloquear el soleamiento directo y las mantienen retraídas al final del día de trabajo o al principio de la mañana.
- Parece que la mayor motivación en el manejo de las persianas es la eliminación del deslumbramiento más que la prevención del sobrecalentamiento.
- Las personas sólo interactúan con las persianas en condiciones extremas de discomfort y se utilizan inapropiadamente: no siempre se retraen cuando no hay excesiva luz natural exterior ni siempre se cierran con altas *ganancias solares*.
- La posición del Sol y la cantidad de *radiación solar* son determinantes: con una menor *altura solar* (invierno) se obtiene una mayor penetración solar en el espacio y los ocupantes se ven forzados a cerrar las persianas, mientras que suelen mantenerse abiertas cuando la *radiación solar* es más fuerte e intensa (verano) pero con una mayor *elevación* y menor penetración en el espacio, aunque proporcionen mayores *ganancias solares*.

La determinación de rangos de valores absolutos requiere que se siga avanzando en esta área de conocimiento y se obtenga un límite sobre la *irradiación solar* que entra en el espacio a través de la ventana complementado con la penetración del Sol en el espacio. Éste es, por tanto, todavía un campo activo de investigación donde se tiene una gran variedad de resultados experimentales pero no un criterio unificado [332].

Considerando que los resultados de la simulación energética permiten conocer la *ganancia solar térmica a través del hueco*, en base a los valores sobre la interacción de los usuarios con los elementos de protección solar, se propone como *valor límite 150 W/m<sup>2</sup>*. Tomando este valor como límite se tiene una cierta certeza de que los ocupantes actuarán sobre los dispositivos de protección para evitar bien situaciones de deslumbramiento como situaciones de sobrecalentamiento del espacio. De esta forma, en combinación con el *criterio de Suficiente Luz Natural*, se obtiene no sólo el potencial de *disponibilidad de luz natural* sino también su acotación superior.

Para poder aplicar dicho criterio, se obtiene, a partir del valor de la *irradiación (W/m<sup>2</sup>)*, el valor máximo de *ganancia solar térmica (W)* multiplicando dicho valor límite por la superficie semitransparente (m<sup>2</sup>) y por el *factor solar o coeficiente de ganancias solares* del vidrio.

$$SHG = A_s I (SHGC)$$

Ecuación 26: Carga térmica por radiación solar a través de un elemento semitransparente [135].

Donde:

- SHG es la carga térmica o las *ganancias solares a través de las ventanas exteriores (W)*
- A<sub>s</sub> es la superficie semitransparente expuesta a la radiación (m<sup>2</sup>);
- I es la *irradiación total incidente (W/m<sup>2</sup>)*;
- SHGC es el *Coeficiente de Ganancias Solares o Factor Solar* del elemento semitransparente.



### 3.3.4 Magnitudes y unidades de medida

Mientras que para describir las condiciones de iluminación natural e insolación se establece un marco común para obtener los datos en el mismo rango temporal y expresar los datos en la misma unidad temporal y dimensional, para poder compararlos y analizarlos es necesario que éstos tengan las mismas unidades de medida, convirtiéndose de esta forma en *nuevos indicadores de iluminación natural e insolación*.

Este trabajo de investigación tiene entre sus propósitos el análisis integrador de la componente lumínica y térmica de la radiación solar que entra en un espacio, es decir el análisis del impacto de la irradiancia solar global sobre las condiciones de iluminación natural e insolación. Ésta se expresa en  $W/m^2$ , magnitud que se utiliza habitualmente en el ámbito térmico para expresar la densidad de las cargas térmicas. En el ámbito lumínico se utiliza la equivalente fotópica de la irradiancia, el lux, utilizando *modelos de eficacia luminosa* [112] teniendo en cuenta la *curva espectral de sensibilidad fotópica CIE*.

El método tradicional del cálculo del *Factor de Iluminación Natural (DF)* como indicador de la componente lumínica, y de la presencia solar mediante el empleo de las cartas solares producen resultados imposibles de reconciliar, ya que uno considera como base de cálculo la *iluminancia difusa*, sin presencia solar directa, y el estudio de las *horas de soleamiento* considera sólo la acción solar, sin la presencia del cielo [50].

Es decir, tanto las magnitudes como las unidades de medida de los indicadores suelen expresarse en términos diferentes, lo cual dificulta la comparación de resultados y la realización de un análisis integrador de las condiciones de iluminación natural e insolación de cada caso particular y de grupos de casos. Para expresar los indicadores en las mismas unidades de medida es necesario conocer cómo se han derivado a partir de los valores de *irradiancia/iluminancia* ( $W/m^2$ , lux):

- Los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)* expresan las horas, ya sea en términos relativos (%) o absolutos (h), en que un punto del espacio cumple con unos determinados requisitos de iluminación (lux). En este caso, para obtener el nivel de iluminación en cada punto del plano de trabajo es necesario fijar un momento determinado del año, un análisis instantáneo, de forma que cada punto mostrará el resultado de buscar en su serie temporal de iluminancias el valor correspondiente a dicho momento.
- El *Factor de Iluminación Natural* expresa el porcentaje de iluminancia difusa (%) que adquiere un punto del espacio respecto a la iluminancia difusa horizontal exterior, por lo que determinada esta última, se obtiene el valor de iluminancia (lux) que tiene dicho punto. Este valor puede obtenerse del archivo climático de la localidad, por lo que en función del momento del año que se elija el valor de iluminación interior será diferente.
- Las *ganancias solares* vienen expresadas en vatios (W) como resultado de haber multiplicado la *irradiación incidente total* ( $W/m^2$ ), suma de la *radiación incidente* en cada momento del año, por la suma de la superficie de ventana del espacio ( $m^2$ ) y por el *factor solar del hueco*. Una aproximación a la obtención de la irradiación solar en la cara interior del hueco puede ser repercutir las ganancias solares sobre la superficie de hueco. Sin embargo, esta superficie de hueco no es normal a la radiación solar incidente, por lo que, aunque resulta un buen indicador, no aporta precisión de resultados. Por otro lado, para obtener la ganancia solar en un momento dado es necesario buscar dicho valor en la serie temporal.

En el caso del *Factor de Iluminación Natural* el valor de iluminancia que representa cada punto de cálculo del plano de trabajo depende del valor de *iluminancia horizontal difusa exterior* ( $E_{h,d}$ ), de forma que el conjunto de valores resultante corresponde con un momento determinado en el tiempo. La distribución de valores en el plano de trabajo muestra la obtención simultánea de unos valores de iluminancia difusa en cada punto.

Sin embargo, los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural*, tal como se expresan actualmente, no proporcionan esta simultaneidad. Tal como se ha visto anteriormente, mediante un análisis horario del plano de trabajo es posible conocer cuántos sensores alcanzan simultáneamente un determinado valor de iluminancia.

Establecido el *criterio de Suficiente Luz Natural* como el porcentaje del plano de trabajo que alcanza 300 lux durante el 50% del tiempo [125], se ha definido la *Suficiencia de Iluminación Natural Difusa* (*Diffuse Daylight Sufficiency -DSd*) como aplicación de dicho criterio al concepto del *Factor de Iluminación Natural*. Para evaluar las condiciones de iluminación natural utilizando el indicador *DSd* sólo es necesario determinar qué porcentaje del plano de trabajo (%wp) es suficiente para considerar el espacio iluminado naturalmente.

El problema que se encuentra a la hora de comparar los resultados de *DSd* con los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural* reside en la pérdida de simultaneidad que representan estos últimos. Sin embargo, si se realiza un análisis horario del plano de trabajo es posible obtener el porcentaje del plano de trabajo (%wp) en que se alcanzan simultáneamente los 300 lux fijados como nivel de iluminación mínimo. De esta forma se obtiene una serie temporal de valores horarios de proporción del plano de trabajo que cumple con el objetivo de iluminancia, es decir, una serie temporal cuya unidad de medida que considera el plano de trabajo como unidad dimensional de análisis.

Por tanto, para terminar de aplicar el criterio de Suficiente Luz Natural habría que determinar qué valor de porcentaje del plano de trabajo tiene una frecuencia igual o mayor al 50% del periodo considerado, horas diurnas en el ámbito de esta investigación.

Para diferenciarlo del indicador *Autonomía Espacial de Luz Natural* (*Spatial Daylight Autonomy -sDA*) se define la *Suficiencia de Iluminación Natural Global* (*Global Daylight Sufficiency -DSg*) como el porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente 300 lux durante el 50% de las horas diurnas debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.

La aplicación del *criterio de Suficiente Luz Natural* al concepto del *Factor de Iluminación Natural* y de *Autonomía de Luz Natural* en base al análisis horario, y no puntual, de la serie temporal de iluminancias en cada punto de cálculo del plano de trabajo da lugar a dos nuevos indicadores de iluminación natural que expresan la contribución difusa y global, respectivamente, de la luz natural teniendo al plano de trabajo como unidad dimensional de análisis y medida.

Así mismo, al aplicar el análisis horario del plano de trabajo para obtener el porcentaje del plano de trabajo (%wp) que se encuentra en cada momento en un determinado rango de iluminancias también se puede evaluar el *potencial de iluminación natural* de un espacio para el desarrollo de determinadas tareas visuales.

En base a los rangos de iluminancia propuestos en función de la precisión de las tareas visuales se define la *Iluminancia Natural Útil Simultánea* (*Simultaneous Useful Daylight Illuminance -sUDI<sub>range</sub>*) como un conjunto de 5 indicadores que muestran el porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente 5 rangos diferentes de

iluminancia ((100 lux, 100-300 lux, 300-500 lux, 500-3000 lux y >3000 lux) durante las horas diurnas debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.

Al expresarse en porcentaje de plano de trabajo pueden establecerse relaciones con los indicadores de *Suficiencia Global y Difusa de Iluminación Natural (DSg y DSd)*. Sin embargo, no es posible realizar la misma operación para comparar los datos de *iluminancia* en el plano de trabajo con la entrada de *irradiancia* a través de los huecos ya que, debido a la direccionalidad de la *radiación solar*, no es real repercutir la cantidad de calor que entra en el espacio por la superficie del plano de trabajo ya que ésta no incide uniformemente en dicha superficie.

No obstante, tanto los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural* como las *ganancias solares a través de las ventanas* tienen como datos primarios valores horarios, luego ambos pueden expresarse como porcentaje de horas (%h) en que se cumplen determinados requisitos o criterios de análisis. De esta forma, al establecer la irradiancia límite se obtiene el %h en que se provoca discomfort al usuario:

Se define la *Insolación Excesiva (Excessive Solar Heat Gains -SHGe)* como el porcentaje horas diurnas en que se supera una ganancia solar a través de los huecos exteriores tal que suponga una irradiancia sobre los mismos mayor o igual a 150 W/m<sup>2</sup>.

Como se ha visto anteriormente, al realizar un análisis horario del plano de trabajo de la serie temporal de iluminancias en cada punto se obtiene una serie temporal del porcentaje del plano de trabajo que alcanza unos determinados objetivos de iluminancia, ya sea un nivel mínimo o un rango de iluminancias.

Fijado el nivel mínimo de iluminación en 300 lux, con esta serie temporal de porcentaje de plano de trabajo que alcanza simultáneamente este valor, se puede evaluar el mantenimiento en el tiempo de este nivel de iluminación expresado como porcentaje de horas (%h). Para ello es necesario definir una cobertura mínima del plano de trabajo. Según el estándar '*IES LM-83-12*' [126] para considerar un espacio iluminado naturalmente se debe cubrir el *50% de la superficie* del plano de trabajo.

A partir de estas consideraciones se define la *Suficiencia de Iluminación Natural Mantenido (Maintained Daylight Sufficiency -DSm)* como el porcentaje de horas en que se alcanzan simultáneamente 300 lux en el 50% de los sensores del plano de trabajo debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.

Ambos indicadores, *SHGe* y *DSm*, vienen expresados en %h y permiten evaluar conjuntamente el tiempo en que no es necesario el uso de iluminación artificial acotado superiormente por el tiempo en que se producen situaciones de deslumbramiento y sobrecalentamiento por una entrada excesiva de *radiación solar*.





### 3.4 Procedimientos y medios de expresión

La evaluación de las condiciones de iluminación natural suele realizarse en dos momentos separados dentro del proceso proyectual: en las primeras fases para explorar las primeras estrategias de iluminación natural y al final del proceso de diseño, para su comprobación [16]. Así mismo, para la evaluación de la eficiencia energética del edificio es necesario una definición muy completa del mismo y se suele evaluar al final del proceso proyectual.

Como resultado del número de modelos de cálculo, de las simulaciones realizadas en cada modelo, del número de sensores en el plano de trabajo y del rango y la precisión temporal de la salida de los datos de los programas se obtiene una gran cantidad de información. Por ello se define un sistema para asignar a cada modelo de cálculo un nombre específico y se establece por cada modelo una estructura de archivos. Asimismo se crea una estructura de árbol para las carpetas que contienen estos archivos, con dos niveles: una carpeta por parámetro de estudio (serie) y una carpeta por valor adoptado (modelo de cálculo).

Una vez definidos los modelos de cálculo se procede a la realización de las simulaciones en *DAYSIM*, *DesignBuilder* y *Autodesk Ecotect Analysis*. Cada programa de simulación proporciona unos determinados datos de salida, calculados sobre un espacio o puntos de un plano de trabajo, en un determinado rango temporal y expresados según unas ciertas unidades de medida.

El programa *DAYSIM* genera archivos de resultados con formato «\*.ill» y «\*.DA» en la carpeta donde se ha guardado el modelo. El archivo «\*.ill» corresponde al *perfil anual de iluminancias* naturales calculadas en cada sensor del plano de trabajo en cada etapa temporal de cálculo fijada. Los diferentes archivos «\*.DA» contienen los valores en cada sensor del plano de trabajo del indicador de iluminación natural correspondiente. Así el archivo «\*.daylight\_factor.DA» contiene el valor de *Factor de Iluminación Natural (Daylight Factor- DF)* de cada uno de los sensores del plano de trabajo.

El programa *DesignBuilder* proporciona el perfil anual de *ganancias solares a través de los huecos exteriores* calculadas para todo el espacio. Sin embargo, los resultados se visualizan dentro del propio programa, por lo que requiere de un proceso de exportación de resultados. Este proceso genera un conjunto de valores separados por comas (CSV) que se almacenan en una hoja de cálculo llamada «DB» dentro de un libro de *Microsoft Excel*, nombrado como el modelo para su mejor identificación. Sin embargo, los datos de ganancia solar térmica a través de los huecos exteriores que ofrece *DesignBuilder* vienen expresados en kW, por lo que se crea la hoja «SHG» para convertir los kW en W.

El programa *Ecotect* proporciona resultados sobre la rejilla de cálculo dentro del propio programa por lo que requiere de su exportación con formato «\*.txt» para poder almacenarlos. Con *Ecotect* se obtienen los valores de horas totales de soleamiento y de radiación solar incidente media horaria [Tabla 40].

Dato de origen	Archivos resultantes	Descripción
Datos DAYSIM	«*.ill»	Perfil anual de iluminancias horarias
	«*.daylight_factor.DA»	Factor de Iluminación Natural
Datos DesignBuilder	Libro de trabajo Microsoft Excel «nombremodelo.xlsx». Hoja: «SHG»	Perfil anual de valores horarios de las ganancias solares a través de las ventanas exteriores
Datos Ecotect	«*_sunlight.txt»	Horas totales de soleamiento
	«*_ave hourly radiation.txt»	Radiación solar incidente media horaria

Tabla 40: Salida de datos de los programas de simulación

Tanto la obtención de los datos descriptivos como de los indicadores se lleva a cabo mediante la aplicación de operaciones matemáticas a los datos primarios. Según el dato primario de partida y el dato a conseguir (dato descriptivo o indicador), el tratamiento matemático será diferente. Dicho tratamiento se realiza a partir de la creación y ejecución de rutinas de cálculo específicas para cada dato primario en *MatLab R2011b (7.13.0.564)* y el tratamiento estadístico de los valores resultantes en *Microsoft Office Excel 2007* para realizar su comparación y análisis.

### 3.4.1 Organización de los datos

La gran cantidad de información que se maneja por cada uno de los modelos de cálculo y el número de los mismos, hace necesaria la sistematización del tratamiento de los datos de simulación, así como la condensación de toda la información útil bajo un mismo archivo o carpeta de archivos.

Para empezar, cada modelo debe ser claramente identificado, para lo cual a cada parámetro de estudio se le asigna un número [Tabla 16] y cada modelo se nombra con el número del parámetro y el valor que adopta (p.ej. 02\_45 se refiere al parámetro nº 2 que es el ángulo de obstrucción frontal y 45 es el valor que se estudia en dicho modelo).

Por otro lado, al realizarse un análisis paramétrico sobre unas condiciones de partida, que caracterizan al modelo de referencia, es necesario tener perfectamente definido cada una de las características de localización, orientación, geometría, propiedades ópticas, etc. Esto se realiza mediante la elaboración de unas fichas descriptivas del modelo en una hoja de cálculo dentro de un libro de trabajo de *Microsoft Excel* «nombremodelo.xlsx» [Figura 235].

Para unificar y sistematizar la información, esta ficha incluye los valores que adopta el modelo no sólo de los parámetros presentes sino de los parámetros de estudio que en dicho modelo tienen un valor nulo, como puede ser el caso de las protecciones solares, que sólo hacen aparición en las series 10, 11 y 12 y permanecen con valor nulo en las demás. De este modo en la ficha descriptiva aparecen reflejados todos los parámetros, principales y derivados, involucrados en esta investigación.

Condiciones exteriores			
Localización		Sevilla (37° 42' N) clima mediterráneo	
Archivo climático		ESP_Sevilla.083910_IWEC.epw	
Orientación		180° (S)	
Obstrucción frontal			
Pendiente (%)	0.00%	Altura (m)	1.03
Ángulo de elevación (°)	0.00°	Distancia (m)	1.00
Condiciones espaciales			
Anchura a (m)	3.00	Sup. Suelo y techo (m2) [a*p]	9.00
Profundidad p (m)	3.00	Sup. Fachada y Opuesta (m2) [a*h]	9.00
Altura h (m)	3.00	Sup. Paredes perpend.(m2) [p*h]	9.00
Volumen (m3)	27.00	Sup. Envoltorio (m2)	54.00
Coeficientes de forma		Coeficientes de reflexión	
Compacidad (Volumen/ΣSup.)	0.50	Suelo (%)	20%
Forma Suelo y techo. [a/p]	1.00	Fachada y Opuesta (%)	50%-50%
Forma Fachada y Opuesta [a/h]	1.00	Paredes Perpend. (%) [Izqda-Dcha]	50%-50%
Forma Paredes perpend. [p/h]	1.00	Techo (%)	80%
Plano de trabajo			
Altura (m)	0.80	Nº de puntos de estudio	841
Características del Acristalamiento			
Sup. Ventana (m2)	0.90	Sup. Ventana/Suelo (%)	10.03%
Ancho av (m)	0.950	Sup. Ventana/Fachada (%)	10.03%
Alto hv (m)	0.950	Sup. Ventana/Volumen (%)	3.34%
Factor de forma (av/hv)	1.00	Transmitancia visible (%)	88.36%
Distancia Suelo y Techo [S-T]	1.03-1.03	Transmitancia solar (%)	77.07%
Distancia Paredes [Izqda-Dcha]	1.03-1.03	Coefficiente de Ganancia Solar (%)	81.80%
Nº de ventanas	1.00	Transmitancia Térmica (W/m2K)	5.699
Filas	1.00	Columnas	1.00
Voladizo		Saliente lateral	
Ángulo de obstrucción (°)	0°	Ángulo de obstrucción (°)	0°
Ángulo de elevación visible (°)	90° (0° a 90°)	Ángulo de azimut visible (°)	180° (-90° a 90°)
Profundidad (m)	0.00	Profundidad (m)	0.00
Lamas Horizontales		Lamas Verticales	
Ángulo de obstrucción (°)	0°	Ángulo de obstrucción (°)	0°
Ángulo de elevación visible (°)	90° (0° a 90°)	Ángulo de azimut visible (°)	180° (-90° a 90°)
Profundidad (m)	0.10	Profundidad (m)	0.10
Separación entre lamas (m)	∞	Separación entre lamas (m)	∞
Nº lamas	0.00	Nº lamas	0.00
Retícula lamas		Elementos Horizontales	
Ángulo de obstrucción (°)	0°	Ángulo de obstrucción (°)	0°
Ángulo de elevación visible (°)	90° (0° a 90°)	Ángulo de azimut visible (°)	180° (-90° a 90°)
Profundidad (m)	0.1	Profundidad (m)	0.1
Separación entre lamas (m)	∞	Separación entre lamas (m)	∞
Nº lamas	0.00	Nº lamas	0.00
Elementos Verticales		Elementos Horizontales	
Ángulo de obstrucción (°)	0°	Ángulo de obstrucción (°)	0°
Ángulo de elevación visible (°)	90° (0° a 90°)	Ángulo de azimut visible (°)	180° (-90° a 90°)
Profundidad (m)	0.1	Profundidad (m)	0.1
Separación entre lamas (m)	∞	Separación entre lamas (m)	∞
Nº lamas	0.00	Nº lamas	0.00

Figura 235: Ficha descriptiva del modelo de referencia en el libro de *Microsoft Excel* «00\_ref.xlsx». P.M. Esquivias.



### 3.4.2 Medios de expresión

Para la obtención de resultados de investigación que describan las condiciones de iluminación natural de un espacio arquitectónico es necesario fijar cuáles son los resultados a obtener, el procedimiento a seguir para obtenerlos y cómo expresarlos para que puedan ser fácilmente comprensibles.

Desde la creación de los primeros procedimientos de cálculo de iluminación natural en la primera mitad del siglo XX hasta la actualidad, se han desarrollado diversos métodos en base al estado del conocimiento sobre la luz natural y en base a las técnicas de computación disponibles.

En iluminación no sólo interesa saber la cantidad de luz que entra en el espacio, sino cómo se distribuye, generalmente a lo largo del plano de trabajo, que es el plano sobre el que se desarrolla habitualmente la actividad visual, al que le exigimos ciertos requisitos respecto al nivel de iluminación.

Los resultados de los estudios de iluminación normalmente se muestran como la distribución de valores sobre un plano, calculados punto a punto, pudiendo de esta forma ser graficados los puntos de dicho plano de igual valor, formando las isóneas [Figura 236].

Los resultados de simulación, por tanto, pueden ser presentados como valores individuales en cada punto, como visualización fotográfica, o como mapas de falso color de una escena. Como el ser humano no es capaz de «ver» los luxes, los datos de iluminancia tienen que ser «traducidos o transformados» en indicadores de comportamiento de luz natural.

La variabilidad espacial o la distribución de valores en un plano es el procedimiento de expresión habitual de mostrar los resultados de *Factor de Iluminación Natural (DF)* de un modelo individual.

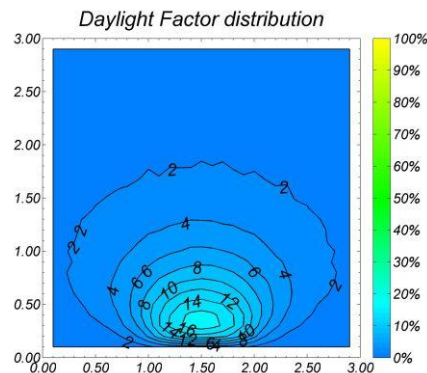


Figura 236: Representación gráfica del *Factor de Iluminación Natural* mediante isóneas y falso color. P.M. Esquivias.

Tradicionalmente los estudios de iluminación natural, basados en condiciones de iluminación difusa, se complementaban con estudios de soleamiento, aportando información sobre la incidencia directa de la luz solar.

Los estudios de soleamiento se basan fundamentalmente en la geometría solar, siendo la información aportada de carácter gráfico para momentos determinados del año y ajenos a las condiciones climáticas [Figura 237]. Los estudios de soleamiento aportan información sobre las zonas con radiación solar directa (zonas de luz) y las que no reciben dicha radiación (zonas de sombra) sin considerar la componente difusa o la componente indirecta.

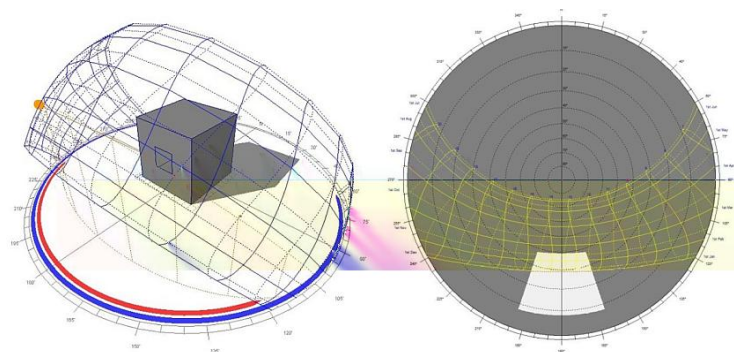


Figura 237: Estudio de soleamiento. Proyección estereográfica de un punto del espacio. P.M. Esquivias.

También las condiciones de soleamiento, mediante la proyección de sombras que señalen la presencia de «manchas solares» en el plano de trabajo, plantean representaciones espaciales como uno de los medios de expresión más habituales.

Como hemos visto anteriormente, la distribución de valores  $DF$  en el plano de trabajo va a ser constante en el tiempo, sin embargo, para mostrar las condiciones de soleamiento a lo largo del año es necesario mostrar una composición de los «momentos más representativos» del mismo, normalmente los solsticios y equinoccios a las 9'00h, 12'00h y 15'00h como mínimo. Por tanto, la representación de la variación de las condiciones de soleamiento a lo largo del año, supone, como mínimo, la presentación de un informe con 12 gráficas diferentes para mostrar la evolución temporal.

A diferencia de la iluminación, donde se trabaja con cada punto del plano de trabajo (o sensores), el análisis energético trabaja con zonas térmicas nodales, de forma que los resultados térmicos obtenidos son valores volumétricos pudiendo obtener dichos resultados de forma horaria o en intervalos menores de tiempo, representados mediante curvas de evolución temporal.

En el caso de que se ha optado por un cálculo horario se obtiene una curva de 8760 valores a lo largo del eje de abscisas, cuya magnitud habitualmente se muestra en el eje de coordenadas [Figura 238]. El resultado es que estas curvas son difícilmente legibles o de gran longitud, por lo que se suele recurrir a representaciones mediante diagramas de barras a partir de valores normalmente mensuales.

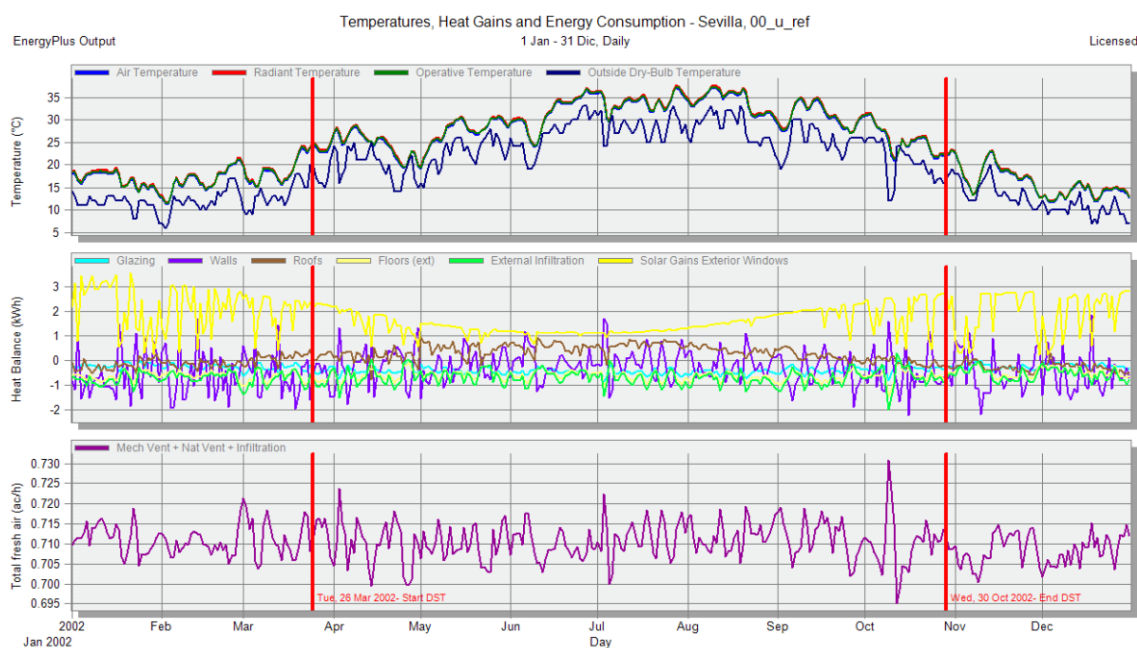


Figura 238: Evolución temporal de resultados obtenidos tras una simulación energética con *DesignBuilder*.

Los estudios térmicos, desde su concepción, están ligados a las condiciones climatológicas de la localidad donde se ubique el edificio a estudiar. Los estudios de iluminación, hasta hace relativamente pocos años, fundamentalmente consideraban la *latitud* del lugar de estudio para conocer la *luminancia* del *cénit* o la *iluminancia horizontal exterior* sobre los que basar el cálculo del *Factor de Iluminación Natural*. Del mismo modo, para realizar estudios de soleamiento sólo es necesario conocer la *latitud* del lugar.

La reciente creación de los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)* basados en las condiciones climáticas está cambiando la forma en que se estudia y analiza el acondicionamiento lumínico [Figura 239]. Cuentan con una metodología propia de cálculo, en la que la obtención del *Factor de Iluminación Natural* es sólo un caso concreto del procedimiento de cálculo.

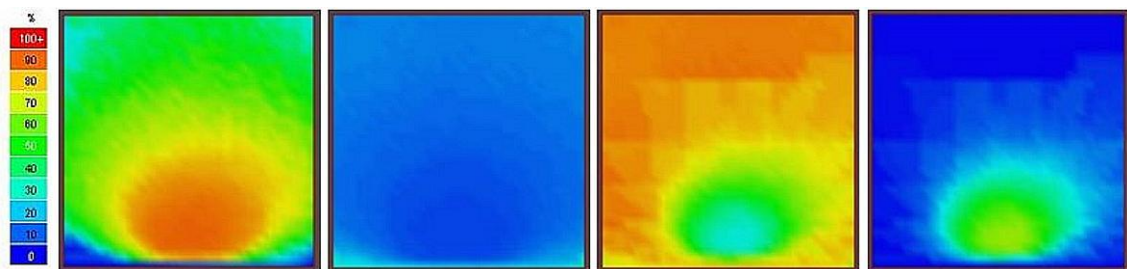


Figura 239: Distribución de valores de *Autonomía de Luz Natural* y los tres rangos de *Iluminancia Natural Útil* (<100 lux, 100-2000 lux y >2000 lux) sobre el plano de trabajo [319].

Los resultados que proporcionan se muestran como una distribución de valores en el plano de trabajo (una *-DA-* o tres *-UDF-*) obtenidos tras el análisis estadístico punto a punto de los valores horarios de iluminancia global contenidos en la serie temporal conseguida de la simulación durante un periodo de tiempo determinado, mientras que los resultados de *DF* son el resultado directo de la resolución de una ecuación, representativo de una situación invariante en el tiempo.

Sin embargo, aunque ya tienen aproximadamente 15 años de antigüedad, todavía hay muchos usuarios que no conocen estos indicadores o prefieren seguir utilizando el *Factor de Iluminación Natural*, debido a su sencillez o por la comodidad de un procedimiento conocido. El establecimiento de un método que permita comparar los nuevos indicadores con los antiguos supondrá un impulso hacia la difusión y admisión de los nuevos avances en el estudio de la iluminación natural.





### 3.4.2.1 Resultados descriptivos

Los resultados descriptivos que se proponen en esta tesis, están formados por datos de diferentes magnitudes y unidades de medida, pero tienen la misma base temporal (horas diurnas) y la misma unidad dimensional de análisis, en la medida de lo posible.

Teniendo en cuenta que las condiciones de iluminación natural y de insolación se pueden resumir como la evolución en el tiempo y en el espacio de los *niveles de iluminación (lux)* y de las *ganancias solares (W)*, los resultados descriptivos deben poder expresar dicha evolución para poder entender el comportamiento espacio-temporal de las variables estudiadas. En general el problema ante los nuevos desarrollos en el campo de la iluminación reside en mostrar la variabilidad tanto en el plano de trabajo como en el tiempo de las condiciones de iluminación natural de un espacio. Ambos aspectos son intrínsecos y fundamentales para su descripción.

Normalmente el *Factor de Iluminación Natural (DF)* y los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)* utilizan como medio de expresión la distribución de valores sobre el plano de trabajo, el trazado de las curvas isolíneas y los mapas de falso color para mostrar los resultados de un modelo individual, mostrando la vertiente espacial de las condiciones de iluminación natural; sin embargo los estudios energéticos tienden a mostrar los valores individuales mediante una curva de evolución temporal, cuyas etapas temporales, por cuestiones operativas, suelen ser mensuales, mostrando, por tanto, la evolución temporal de las ganancias térmicas, entre otros.

Diversos estudios sobre las condiciones de iluminación natural bajo la modificación de diferentes parámetros utilizando los *Indicadores Dinámicos de Iluminación* evidencian que el análisis de la iluminación natural no sólo debe basarse en un análisis estadístico de los valores obtenidos en el plano de trabajo, sino que siempre debe complementarse con el análisis de la distribución de dichos valores en el plano de trabajo [16] para detectar las zonas suficientemente iluminadas naturalmente, las que requieren de una iluminación artificial de forma constante y aquellas en las que la luz eléctrica se complementa con la luz natural. Sin embargo, no podemos olvidar que el mapa de falso color sigue siendo un resultado de referencia en la comunidad internacional y en la práctica profesional para describir las condiciones espaciales de la iluminación natural.

Una de las ventajas de la representación mediante mapa de falso color de la distribución de los valores de *Factor de Iluminación Natural* es que muestra la distribución espacial instantánea de la *iluminancia horizontal difusa* sobre el plano de trabajo. Sin embargo, el mapa de falso color del *Factor de Iluminación Natural* [Figura 240] también nos aporta información sobre la distribución cualitativa de la contribución difusa de la iluminación natural, predominante cuando se tiene ausencia de soleamiento directo en el espacio motivada por diversos motivos. El mapa de falso color de *DF* muestra la iluminación anual sin presencia de sol y bajo unas condiciones continuas de cielo nublado.

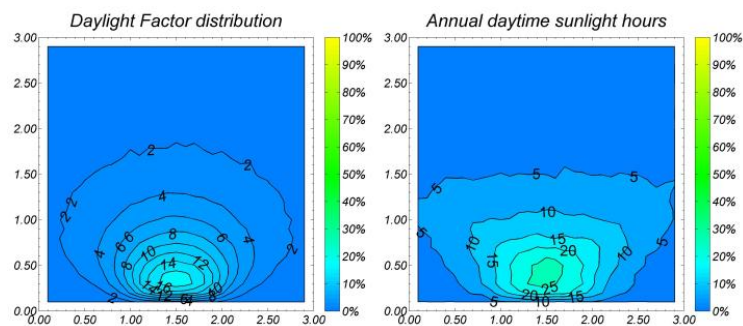


Figura 240: Mapa de falso color del *Factor de Iluminación Natural* y del porcentaje de horas de soleamiento anual. [Fig.3 y 4 Tabla 43]. P.M. Esquivias

Para poder tener una visión completa de las condiciones de iluminación sería necesario conocer la distribución espacial de la componente directa de la iluminación natural, que corresponde con la distribución espacial de la insolación. En este sentido se puede utilizar la distribución espacial del número de *horas de soleamiento* como indicador del potencial de soleamiento de un espacio.

Para poder comparar ambas gráficas, es necesario que estén expresadas en los mismos términos, para ello, considerando las herramientas disponibles, los resultados que ofrecen y que se quiere conseguir una distribución cualitativa de la contribución directa de la iluminación natural, se opta por obtener las *horas de soleamiento* que recibe cada punto del plano de trabajo en cada hora y repercutirlas sobre las horas diurnas de forma que se obtiene un mapa de falso color del porcentaje de horas de soleamiento anual como un indicador que muestre las zonas del espacio que recibirán una mayor proporción de incidencia solar directa [Figura 240].

Sin embargo, las *horas de soleamiento* no muestran la intensidad de la *radiación solar directa* que incide en el espacio. Por eso se complementa el estudio de distribución de valores sobre el plano de trabajo con el cálculo de la *radiación solar incidente* en cada punto del mismo, obteniendo finalmente un mapa de falso color de la radiación solar incidente media horaria [Figura 241].

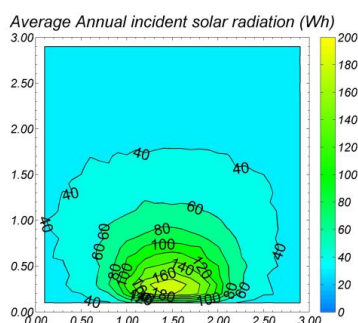


Figura 241: Mapa de falso color de la radiación solar incidente media horaria. [Fig. 5 Tabla 43]. P.M. Esquivias.

Por otro lado, los mapas temporales han demostrado ser una herramienta de expresión gráfica de gran potencial para mostrar la evolución en el tiempo de un indicador, donde el eje de abscisas corresponde a los días del año y el eje de ordenadas corresponde con las horas del día. Bajo este formato también se muestran, de forma descriptiva, las condiciones de iluminación natural e insolación del espacio [Figura 242, Figura 243].

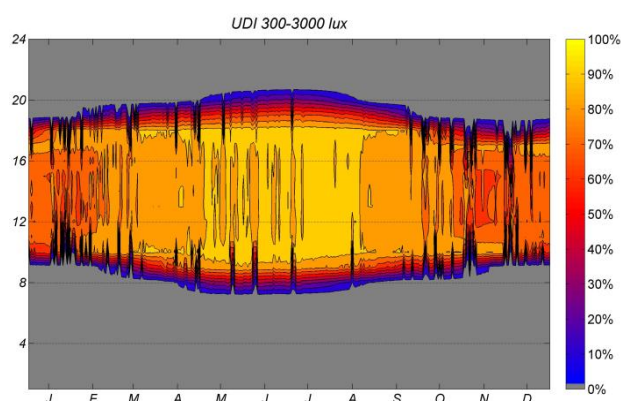


Figura 242: Mapa temporal de UDI 300-3000 lux. [Fig 1 Tabla 43]. P.M. Esquivias.

Las condiciones de iluminación natural mostradas se basan en el análisis horario del plano de trabajo, de forma que cada punto del mapa temporal muestra el comportamiento de dicho plano en cada instante.

Debido a que la mayoría de las tareas visuales se realizan bajo un nivel de iluminación comprendido entre 300 y 3000 lux, permaneciendo este último valor como indicador del comienzo de posibles problemas de deslumbramiento, cada punto del mapa temporal de UDI 300-3000 muestra el porcentaje del plano de trabajo que se encuentra simultáneamente entre 300 y 3000 lux en cada hora del año [Figura 242].

La simulación energética ofrece valores horarios sobre la cantidad de calor total que entra a través de la ventana, la repercusión de la misma sobre la superficie del hueco nos ofrece información sobre la irradiancia vertical interior (W). Con los datos de irradiancia se obtiene el mapa temporal de las *ganancias solares a través de las ventanas* [Figura 243].

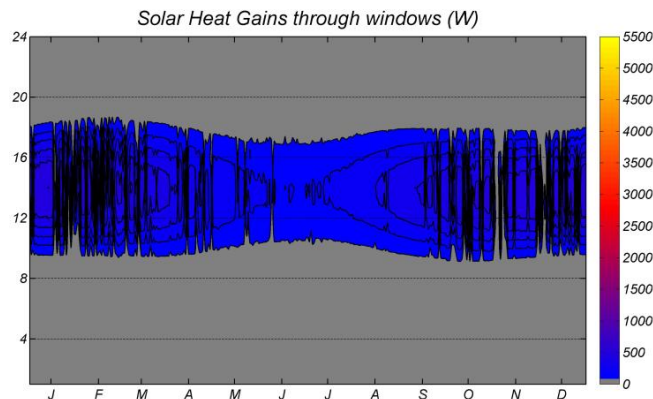


Figura 243: Mapa temporal de las ganancias solares a través del hueco. [Fig 2 Tabla 43]. P.M. Esquivias.

El objetivo de la obtención de los mapas de falso color del *Factor de Iluminación Natural*, las *horas de soleamiento* y la *radiación solar incidente* es la realización de un análisis cualitativo de la distribución de los valores sobre el plano de trabajo.

Por tanto, se propone como medio de expresión de los resultados descriptivos individuales de las condiciones de iluminación e insolación obtenidos para cada modelo:

- La representación gráfica de la distribución de los valores obtenidos en cada punto del plano de trabajo de diferentes magnitudes que permitan mostrar tanto la distribución de la iluminación difusa y la insolación en el plano de trabajo para detectar la presencia de posibles «manchas solares», expresada mediante mapas de falso color.
- La representación gráfica de la evolución temporal de las condiciones de iluminación natural y de *ganancias solares térmicas a través de las ventanas* mediante mapas temporales.



### 3.4.2.2 Resultados analíticos

La aplicación de los *criterios de Suficiente Luz Natural, Iluminancia Útil para las tareas visuales y de Insolación Excesiva* da lugar a la definición de la *Suficiencia Global y Difusa de Iluminación Natural (Global Daylight Sufficiency y Diffuse Daylight Sufficiency -DSg y DSd)* expresados como porcentaje del plano de trabajo y de la *Suficiencia de Iluminación Natural Mantenido y la Insolación Excesiva (Maintained Daylight Sufficiency y Excessive Solar Heat Gains -DSm y SHGe)* expresados como porcentaje de horas diurnas.

Así mismo también se obtienen series temporales del porcentaje del plano de trabajo que se encuentra simultáneamente dentro de unos determinados rangos de iluminancia útiles para el desarrollo de tareas visuales de diferente precisión. Este conjunto se llama *Iluminancia Natural Útil Simultánea (Simultaneous Useful Daylight Illuminance -sUDI)* y se expresa en porcentaje del plano de trabajo. El cumplimiento del *criterio de Suficiente Luz Natural* puede expresarse gráficamente mediante la gráfica de *Suficiencia Espacial de Iluminación Natural (spatial Daylight Sufficiency)* donde se relacionan los nuevos indicadores *Suficiencia de Iluminación Natural Global y Mantenido (DSg y DSm)* [Figura 244].

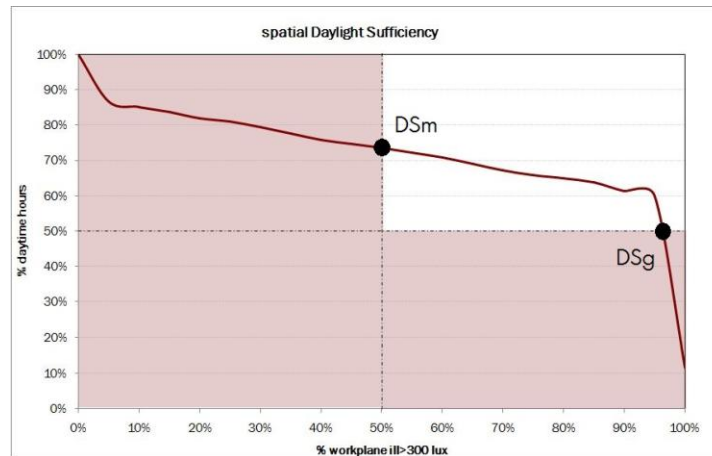


Figura 244: Curva de Suficiencia Espacial de Iluminación Natural. P.M. Esquivias

Por otro lado, la relación entre la cantidad de *radiación solar* que puede provocar tanto deslumbramiento como sobrecalentamiento puede expresarse mediante la gráfica de *Excesiva Radiación Solar* donde se muestran los valores mensuales de *Insolación Excesiva (SHGe)* y el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia simultánea mayor de 3000 lux cubierto con la misma frecuencia temporal expresado mediante el indicador *excesiva Iluminancia Natural Útil Simultánea (sUDI<sub>>3000</sub>)* [Figura 245].

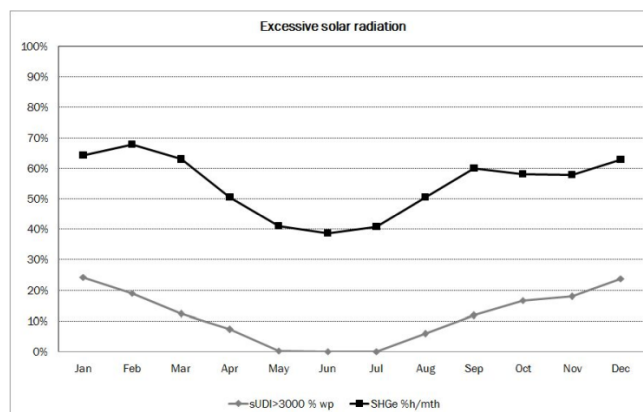


Figura 245: Curva de Excesiva Radiación Solar. P.M. Esquivias

Considerando que los indicadores *DSg*, *DSd* y *sUDI* expresan el porcentaje del plano de trabajo que alcanza o supera simultáneamente un determinado nivel de iluminación, el valor de cada uno de ellos depende del periodo de análisis, es decir, que estos indicadores varían con el tiempo.

En este sentido son de gran utilidad, por su expresividad e intuitividad de interpretación, los medios de expresión utilizados en los análisis en el tiempo de las cargas térmicas de un espacio, expresados en base mensual, a través de diagramas de barras y curvas de evolución de valores.

Siendo la etapa mensual la más adecuada para apreciar la evolución anual de valores, para el análisis de cada modelo de cálculo se muestran los valores de los indicadores calculados en base mensual para apreciar la evolución a lo largo del año y de esta forma poder diseñar estrategias de iluminación natural estacionales en función de la posición solar.

El concepto de *Iluminancia Natural Útil (UDI)* desarrollado por *Mardaljevic* realmente se basa en la clasificación de un conjunto de valores, que constituyen el 100% del plano de trabajo en cada instante. Siguiendo esta filosofía, la expresión gráfica que se adapta mejor a este concepto es la de un gráfico de columnas apiladas, de forma que se pueda observar la clasificación parcial de todo el conjunto de valores considerado, por lo que se utiliza este medio de expresión para mostrar la evolución en el tiempo de los cinco valores *sUDI*.

Sin embargo, para analizar la evolución en el tiempo de los indicadores *DSg* y *DSd*, es más adecuada la utilización de curvas de evolución temporal. Por otro lado, aunque *DSm* y *SHGe* muestran el porcentaje de horas en que se alcanza una determinada cobertura del plano de trabajo con una determinada iluminación o bien un valor límite, dicho porcentaje también depende del periodo de análisis considerado, por lo que también se expresan como curvas de evolución temporal.

Como finalmente se tienen dos unidades de medida diferentes: porcentaje del plano de trabajo y porcentaje de horas; se utilizan ambos ejes verticales para poder representarlos en la misma gráfica. Además, como ambas unidades están expresadas en porcentaje, es decir, mediante valores relativos a un total, ambos ejes tienen un rango de variación de 0 a 100% [Figura 246].

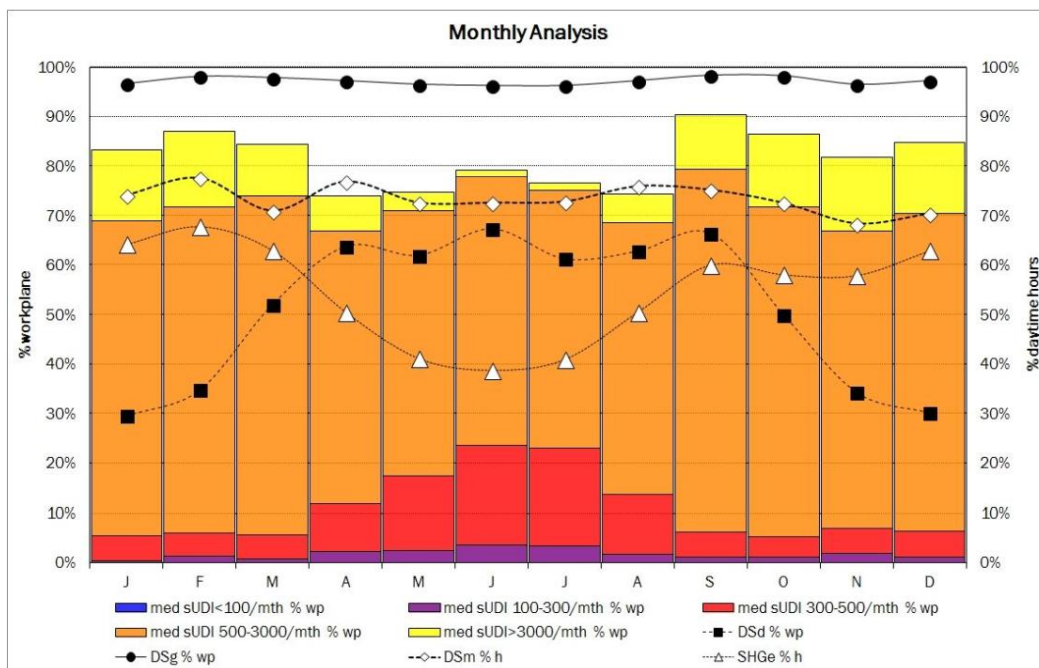


Figura 246: Gráfica de análisis mensual del modelo de referencia. P.M. Esquivias

Para distinguir los diferentes indicadores se opta por establecer códigos de colores para mostrar la clasificación del plano de trabajo en diferentes rangos de iluminancia y se establece un código de símbolo y color para diferenciar el tipo de indicador y el tipo de unidad de medida, de forma que el negro se asocia al plano de trabajo y el blanco a las horas y se asocia la *Insolación excesiva* con el triángulo (símbolo del fuego), la *Suficiencia de Luz Natural Mantenido* con el rombo (símbolo de evolución temporal), la *Suficiencia de Luz Natural Global* con el círculo (símbolo del todo) y la *Suficiencia de Luz Natural Difusa* con el cuadrado (símbolo de la estabilidad).





### 3.4.3 Tratamiento de datos

Para obtener los datos de *iluminancia*, *ganancias solares* y *horas de soleamiento* en base horaria a lo largo de todo el año se han realizado simulaciones en tres programas distintos: *DAYSIM*, *DesignBuilder* y *Ecotect*. Cada uno de ellos ofrece diferentes tipos y formatos de valores [Tabla 41].

Programa	Dato primario	Formato	Extensión
DAYSIM	Iluminancia horaria en cada punto (lux)	Mapa de valores	«*.ill»
	Factor de Iluminación Natural (%)	Lista de valores	«*daylight_factor.DA»
DesignBuilder	Ganancias solares horarias (kW)	Lista de valores	«nombremodelo.xlsx» Hoja: «SHG»
	Horas de soleamiento totales (h)	Mapa de valores	«*_sunlight.txt»
Ecotect	Radiación solar incidente horaria media anual (Wh)	Mapa de valores	«*_ave hourly radiation.txt»

Tabla 41: Datos primarios y programas de obtención

Para obtener representaciones gráficas y resultados que describan las condiciones de iluminación natural e insolación, ha sido necesario definir diferentes procedimientos de tratamiento de datos en función del tipo, unidad y formato de valores que ofrecen las simulaciones realizadas con cada programa [Tabla 42].

Expresión	Resultado	Dato de origen	Programa	Procedimiento
Mapa de falso color	Factor de Iluminación Natural (%)	Factor de Iluminación Natural (%) «*daylight_factor.DA»	DAYSIM	Redimensionado con MATLAB
	Horas de soleamiento anual (%)	Horas de soleamiento totales (h) «*.txt»	Ecotect	Repercusión anual con MATLAB
	Radiación solar incidente horaria media anual (Wh)	Radiación solar incidente horaria media anual (Wh) «*.txt»	Ecotect	Representación gráfica MATLAB
Mapa temporal	UDI 300-3000 (% plano de trabajo)	Iluminancia horaria en cada punto (lux) «*.ill»	DAYSIM	Análisis horario de iluminancias entre 300 y 3000 lux en el plano de trabajo en MATLAB
	Ganancias solares horarias a través de las ventanas (W)	Ganancias solares horarias a través de las ventanas (kW) «*.xls»	DesignBuilder	Redimensionado con MATLAB

Tabla 42: Resultados descriptivos: Indicadores, formato de expresión, datos de simulación, programas de obtención y procedimientos de tratamiento.



### 3.4.3.1 Resultados descriptivos

Para el tratamiento de datos, realizado con *MATLAB*, se cuenta, por tanto, con el *perfil anual de iluminancias horarias* en cada punto del plano de trabajo (archivo «\*.ill»), los resultados de *Factor de Iluminación Natural* (archivo «\*.daylight\_factor.DA»), las *ganancias solares térmicas* a través de los huecos exteriores (hoja de cálculo «*SHG*»), las *horas de soleamiento anuales* sobre el plano de trabajo (archivo «\*\_sunlight.txt») y la *radiación solar incidente* media horaria sobre el plano de trabajo (archivo «\*\_ave hourly radiation.txt») [Tabla 41].

Estos datos necesitan un cierto tratamiento tanto para el posterior análisis como para su representación gráfica de forma unificada. En función de los resultados que se quieren obtener para cada uno de estos archivos se diseña una rutina diferente en *MATLAB*. El tratamiento realizado por cada archivo de origen y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 43.

Dato de origen	Archivos resultantes	Descripción
«*.ill»	«DDMh.DA»	Análisis horario de iluminancias en el plano de trabajo: %wp>300 lux (DA300,wp) %wp<100 lux (sUDI100,wp) 100>%wp>300 (sUDI100-300,wp) 300>%wp>500 (sUDI300-500,wp) 500>%wp>3000 (sUDI500-3000,wp) %wp>3000 lux (sUDI3000,wp)
	«sUDI 300-3000 temp.xlsx» «Fig1_UDtemp.jpg»	Análisis horario de iluminancias en el plano de trabajo 300 lux >%wp>3000 lux (sUDI300-3000,wp)
Hoja: «SHG»	«SHG temp.xlsx» «Fig2_SHGtemp.jpg»	Conversión de lista a mapa de valores
«*.daylight_factor.DA»	«DF wp.xlsx» «Fig3_DFwp.jpg»	Conversión de lista a mapa de valores
«*_sunlight.txt»	«relative sunlighthours.DA» «SOL wp.xlsx» «Fig4_SOLwp.jpg»	Repercusión horaria
«*_ave hourly radiation.txt»	«ave inc solar radiation.DA» «RAD wp.xlsx» «Fig5_RADwp.jpg»	Formato gráfico

Tabla 43: Procesos seguidos durante la ejecución de rutinas en *MATLAB*

#### Análisis horario de iluminancias en el plano de trabajo

El archivo «\*.ill», que corresponde con el *perfil anual de iluminancias* de cada punto de estudio del plano de trabajo, contiene las iluminancias de todos los sensores y se organiza por columnas, de forma que las tres primeras representan el mes, día y hora y las siguientes representan cada uno de los sensores del plano de trabajo.

De esta forma, considerando un cálculo horario, se tiene una matriz de tamaño 8760×(3+n°sensores), en la que cada fila corresponde con cada hora del año. Actualmente, para obtener los valores de los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)*, se realiza un análisis de iluminancia por cada columna y el resultado de dicho análisis, un valor único para cada sensor del plano de trabajo, se representa gráficamente como una distribución de valores en el plano de trabajo. Este análisis puntual ofrece resultados sobre el porcentaje temporal en que dicho punto alcanza unos determinados requisitos de iluminancia.

Mientras que con el análisis puntual se pierde la concepción del plano de trabajo como elemento unitario, el análisis horario permite conocer qué porcentaje del plano alcanza simultáneamente dichos requisitos de iluminación en cada hora, dando como resultado un único

valor para cada hora del año. El análisis horario de iluminancias en el plano de trabajo se realiza, por tanto, mediante la aplicación de criterios de niveles de iluminación a cada fila de la matriz de iluminancias.

El *criterio de Suficiente Iluminación Natural* considera un nivel mínimo de iluminación de 300 lux. Para distinguir la Suficiencia de Iluminación Natural obtenida con el *Factor de Iluminación Natural (DF)* o mediante la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)*, a la primera se denomina *Suficiencia de Iluminación Natural Difusa (DSd)* y a la segunda *Suficiencia de Iluminación Natural Global (DSg)*.

Por otro lado, para obtener una información más pormenorizada sobre la *Iluminancia Natural Útil*, se ha dividido el rango de iluminancias central en tres partes para diferenciar los niveles de iluminación útiles a las tareas visuales de baja, media y alta precisión y se aplica el análisis horario para obtener información sobre la simultaneidad de obtención de los valores de iluminancia, dando lugar a la *Iluminancia Natural Útil Simultánea (sUDI)*. De esta forma se analiza la concurrencia horaria en 5 rangos diferentes de iluminancia: (100 lux, 100-300 lux, 300-500 lux, 500-3000 lux y >3000 lux).

La rutina creada en *MATLAB* se compone de varias órdenes en función de los objetivos a cumplir. Una vez importado el archivo «\*.ill» (uiimport('-file')), éstas son:

Obtención en cada hora del número de sensores que tiene una iluminancia igual o superior a un valor mínimo (threshold =300) o *Suficiencia de Iluminación Natural Global*:

```
for i=1:size(ill,1)
    DSg(i)=sum(ill(i,4:size(ill,2))>=str2double(threshold))*100/(size(ill,2)-3);
end
```

Orden programación 1: Análisis horario del perfil anual de iluminancias. Obtención de la serie temporal *DSg*

Obtención en cada hora del número de sensores que tiene una iluminancia menor a 100 lux o *sUDI (<100 lux)*:

```
for i=1:size(ill,1)
    UDI1(i)=sum(ill(i,4:size(ill,2))<100)*100/(size(ill,2)-3);
end
```

Orden programación 2: Análisis horario del perfil anual de iluminancias. Obtención de la serie temporal *sUDI<100*

Obtención en cada hora del número de sensores que tiene una iluminancia entre 100 y 300 lux o *sUDI (100-300 lux)*:

```
for i=1:size(ill,1)
    UDI2(i)=(sum(ill(i,4:size(ill,2))<300)*100-
    sum(ill(i,4:size(ill,2))<100)*100)/(size(ill,2)-3);
end
```

Orden programación 3: Análisis horario del perfil anual de iluminancias. Obtención de la serie temporal *sUDI<sub>100-300</sub>*

Obtención en cada hora del número de sensores que tiene una iluminancia entre 300 y 500 lux o *sUDI (300-500 lux)*:

```
for i=1:size(ill,1)
    UDI3(i)=(sum(ill(i,4:size(ill,2))<500)*100-
sum(ill(i,4:size(ill,2))<300)*100)/(size(ill,2)-3);
end
```

Orden programación 4: Análisis horario del perfil anual de iluminancias. Obtención de la serie temporal *sUDI<sub>300-500</sub>*

Obtención en cada hora del número de sensores que tiene una iluminancia entre 500 y 3000 lux o *sUDI (500-3000 lux)*:

```
for i=1:size(ill,1)
    UDI4(i)=(sum(ill(i,4:size(ill,2))<3000)*100-
sum(ill(i,4:size(ill,2))<500)*100)/(size(ill,2)-3);
end
```

Orden programación 5: Análisis horario del perfil anual de iluminancias. Obtención de la serie temporal *sUDI<sub>500-3000</sub>*

Obtención en cada hora del número de sensores que tiene una iluminancia mayor o igual a 3000 lux o *sUDI (>3000 lux)*:

```
for i=1:size(ill,1)
    UDI5(i)=sum(ill(i,4:size(ill,2))>=3000)*100/(size(ill,2)-3);
end
```

Orden programación 6: Análisis horario del perfil anual de iluminancias. Obtención de la serie temporal *sUDI<sub>>3000</sub>*

Con el resultado de estas operaciones se obtienen seis series temporales (matriz 1×8760) que, junto con la obtención de las tres primeras columnas del archivo «\*.ill» (mes, día y hora), componen el archivo «DDMh.DA» (matriz 8760×9) [Tabla 43]:

```
ddm=[time(:,1),time(:,2),time(:,3),DSg',UDI1',UDI2',UDI3',UDI4',UDI5'];
fidD=fopen([PATHNAME1 'DDMh.DA'],'w');
i=1;
for j=1
    fprintf(fidD,'%3.2f %3.2f %3.2f %3.2f %3.2f %3.2f %3.2f %3.2f %3.2f\r\n', ddm');
end
```

Orden programación 7: Obtención del archivo de *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural* en base al análisis horario del perfil anual de iluminancias. Archivo «DDMh.DA»

Una vez obtenidas las seis series temporales que muestran el perfil de las condiciones de iluminación natural del plano de trabajo es posible plasmarlas en mapas temporales. Sin embargo, debido a la necesidad de comprimir la información, para que ésta pueda ser más manejable, se decide mostrar en mapa temporal sólo el rango de iluminancias que son útiles para el desarrollo de la mayoría de las tareas visuales, es decir, entre 300 lux y 3000 lux. Para ello se obtiene la serie temporal UDI 300-3000 siguiendo el mismo procedimiento que para las series anteriores y se redimensiona dicha matriz 1×8760 en una matriz 24×365, formato apto para la representación gráfica mediante mapa temporal. Los datos se exportan a un archivo «*sUDI 300-3000 temp.xlsx*» y la gráfica creada a partir de éstos a un archivo «*Fig1\_UDItemp.jpg*» [Tabla 43].

```

for i=1:size(ill,1)
    UDI300_3000(i)=(sum(ill(i,4:size(ill,2))<3000)*100-
    sum(ill(i,4:size(ill,2))<300)*100)/(size(ill,2)-3);
end
UDItemp=reshape(UDI300_3000',24,[]);
xlswrite('UDI 300-3000 temp.xlsx', UDItemp);

```

Orden programación 8: Análisis horario del perfil anual de iluminancias. Obtención y redimensionado de la serie temporal  $sUDI_{300-3000}$

### **Ganancias solares a través de las ventanas**

La hoja de cálculo «*SHG*» contiene el *perfil horario de ganancias solares térmicas* a través de los huecos exteriores del espacio [Tabla 43]. Dicha hoja se organiza por columnas, de forma que las tres primeras corresponden con el mes, día y hora del periodo de estudio de forma numérica, la cuarta expresa el mes de forma literaria y la quinta contiene los datos de ganancias solares en vatios, de forma que se tiene una matriz de tamaño  $8760 \times 5$ .

Para representar gráficamente las *ganancias solares térmicas a través de los huecos exteriores* como un mapa temporal, sólo es necesario importar la columna de datos de ganancias (matriz  $8760 \times 1$ ) y redimensionarla a una matriz  $24 \times 365$ . Los datos se exportan a un archivo «*SHG temp.xlsx*» y la gráfica creada a partir de éstos a un archivo «*Fig2\_SHGtemp.jpg*» [Tabla 43].

```

SHG=reshape(untitled',24,[]);
xlswrite('SHG temp.xlsx',SHG);

```

Orden programación 9: Redimensionado de la serie temporal *SHG*

### **Distribución del Factor de Iluminación Natural**

El archivo «*\*.daylight\_factor.DA*» contiene el valor del *Factor de Iluminación Natural (DF)* calculado por *DAYSIM* en cada sensor del plano de trabajo [Tabla 43]. Las tres primeras columnas de datos representan la posición X, Y y Z del sensor, y la cuarta columna muestra el valor de *DF*, de forma que es una matriz ( $n^\circ$  sensores)  $\times 4$ .

Sabiendo la dimensión X-Y de la matriz que define la rejilla de cálculo que contiene todos los sensores de estudio, sólo es necesario redimensionar la última columna de datos (matriz  $n^\circ$  sensores  $\times 1$ ) para que tenga un tamaño X-Y. Los datos se exportan a un archivo «*DF wp.xlsx*» y la gráfica creada a partir de éstos a un archivo «*Fig3\_DFwp.jpg*» [Tabla 43].

```

for k=1:size(df,1);
    d(k)=df(k,4);
end
DF1=reshape(d,X,[]);
DF=transpose(DF1);
xlswrite('DF wp.xlsx', DF);

```

Orden programación 10: Redimensionado de la serie de valores *DF* en cada sensor

### Horas de soleamiento relativas en el plano de trabajo

El archivo «\*\_sunlight.txt» que arroja el programa *Ecotect* es un informe con los valores obtenidos en la rejilla de cálculo en forma de valores separados por comas (csv) donde cada fila contiene los valores de los sensores del plano de trabajo con la misma posición Y, ordenados de menor a mayor según su posición X en el plano de trabajo [Tabla 43]. Dicha matriz X-Y tiene un encabezado de cuatro filas donde se muestra información relativa a sobre qué elemento se obtienen los valores, el tipo de valores y el nombre del modelo de cálculo.

El valor en cada punto muestra las horas totales acumuladas de soleamiento a lo largo del periodo de cálculo. Para mostrar la relevancia de dicho soleamiento sobre las horas diurnas es necesario, por tanto, dividir cada valor total por el número de horas diurnas del periodo considerado, 4380 si el periodo de estudio es un año, y multiplicarlo por 100 para obtener el porcentaje.

En este proceso, la obtención de los datos del archivo original da lugar a una matriz  $n^{\circ}$  sensores $\times$ 1. Además de obtener la distribución de valores sobre el plano de trabajo, para lo cual debe redimensionarse a una matriz X-Y, que corresponde con la dimensión de la rejilla de cálculo, interesa que los valores tengan el mismo formato que el archivo «\*.daylight\_factor.DA» para poder realizar el análisis estadístico del plano de trabajo.

Para ello se toman las coordenadas de cada uno de los sensores recogidas en el archivo «\*.pts» que se genera automáticamente en la exportación de *Ecotect* a *DAYSIM*, y se crea, junto con los resultados de horas de soleamiento relativas, un archivo que recoge la matriz  $n^{\circ}$ sensores $\times$ 4, siendo las tres primeras columnas las coordenadas X, Y y Z de cada sensor y la cuarta el porcentaje de horas de soleamiento anual. Esta matriz se exporta a un archivo «\*relative\_sunlighthours.DA», la matriz redimensionada se exporta a un archivo «*SOL wp.xlsx*» y la gráfica creada a partir de ésta a un archivo «*Fig4\_SOLwp.jpg*» [Tabla 43].

```
[fidE, messageE] = fopen([PATHNAME2 FILENAME2], 'r');
[fidF, messageF] = fopen([PATHNAME3 FILENAME3], 'r');
if length(messageE) == 0
    if length(messageF) == 0
        i=1;
        coord = [];
        while feof(fidE) ~= 1
            c = fscanf(fidE, '%f', 3);
            coord = [coord; c'];
            fgets(fidE);
            i=i+1;
        end
        fgets(fidF);
        fgets(fidF);
        fgets(fidF);
        fgets(fidF);
        count = 1;
        dato = [];
```

```

while (feof(fidF) ~= 1) && (count > 0)
    [d, count] = fscanf(fidF, '%f, ');
    if count > 0
        dato = [dato;d'];
    end
end
final = dato'*100/4380;
res = [];
for j=1:size(dato)
    res = [res;final(:,j)];
end
rsh=[coord, res];
fid = fopen([PATHNAME3 'relative_sunlighthours .DA'], 'w');
i = 1;
for j = 1
    fprintf (fid, '%3.2f   %3.2f   %3.2f   %3.2f\r\n', rsh');
end
horas = reshape(res', 29, []);
SOL=transpose(horas);
xlswrite ('SOL wp.xlsx', SOL);
end
end

```

Orden programación 11: Extracción de las *horas de soleamiento* totales, repercusión sobre las horas diarias anuales y redimensionado.

### **Radiación solar incidente media horaria anual**

El procedimiento a seguir con el archivo «\*\_ave hourly radiation.txt» es bastante similar. Este archivo también muestra el valor en cada punto del plano de trabajo precedido con una cabecera, esta vez de cinco filas. Los valores también tienen forma de valores separados por comas en la que cada fila muestra los valores de los sensores con la misma posición Y, ordenados de menor a mayor según su posición X. A diferencia de las horas de soleamiento, no existe un valor máximo de *Radiación Incidente* por lo que se muestran los valores absolutos.

El proceso para la obtención de la gráfica de distribución de valores, por tanto, requiere de la extracción de los datos del archivo «\*\_ave hourly radiation.txt» ignorando la cabecera de forma que se obtiene una matriz n°sensores×1 que se exporta a un archivo «\*\_ave inc solar radiation.DA» y se redimensiona a una matriz X-Y. Los datos se exportan a un archivo «RAD wp.xlsx» y la gráfica creada a partir de éstos a un archivo «Fig5\_RADwp.jpg» [Tabla 43].

```

if length(messageF) == 0
    fgets(fidF);
    fgets(fidF);
    fgets(fidF);
    fgets(fidF);
    fgets(fidF);

```



```
count=1;
val=[];
while (feof(fidF) ~= 1) && (count > 0)
    [v,count] = fscanf(fidF,'%f, ');
    if count > 0
        val = [val;v'];
    end
end
RSI = reshape(v, X, []);
RAD = transpose(RSI);
xlswrite ('RAD wp.xlsx', RAD);
end
```

Orden programación 12: Extracción de los datos de *radiación solar incidente*, discriminación de los valores diurnos y redimensionado.

### **Análisis estadístico de la distribución de la luz natural en el plano**

Uno de los objetivos a la hora de analizar los resultados de cálculo de *Factor de Iluminación Natural (DF)* es la obtención de valores estadísticos del conjunto de datos, que representan los sensores del plano de trabajo, que aporten información sobre la uniformidad del conjunto de valores (valor mínimo/valor medio, valor medio/valor máximo y valor mínimo/valor máximo). Con estos datos se suelen emitir juicios sobre la distribución de la luz natural (difusa) en el plano de trabajo.

El análisis estadístico de la distribución de valores sobre el plano de trabajo ofrece información principalmente cualitativa, basado en los valores de uniformidad del mismo. Este análisis se realiza sobre los valores de la distribución de luz natural difusa (valores *DF*) y directa (*horas de soleamiento*), así como de la distribución de la *radiación solar incidente global*.

De entre estos valores estadísticos, normalmente es el valor medio el que se utiliza como indicador o valor representativo de la distribución de la luz natural en el plano de trabajo. Sin embargo, tal como apunta *J. Mardaljevic* [220], el valor medio no proporciona realmente ningún dato de la distribución de la luz en el plano que no pueda ofrecer la mediana de los valores.

Además, el valor medio puede inducir al engaño cuando se aplica a la distribución de valores en un plano, especialmente en el caso de espacio iluminados lateralmente con grandes diferencias desde las zonas más próximas a la ventana hasta las más alejadas a la misma.

*J. Mardaljevic* defiende la utilización del valor central de la distribución de iluminancias, es decir, de la mediana, ya que, además de proporcionar información estadística de la distribución de valores, es más independiente del tamaño del plano de trabajo y de su ubicación [50].

Por tanto, del conjunto de valores de *Factor de Iluminación Natural* y de *Horas relativas de Soleamiento*, no sólo se obtienen los valores extremos, el valor medio y las diferentes uniformidades, sino que además se obtiene la mediana de valores como indicador del valor central, percentil 50, del conjunto de datos considerados, de forma que complementen la información descriptiva de las condiciones de iluminación natural del modelo [Tabla 44].

	Daylight Factor	Incident Sunlight	Incident Solar Radiation
	%	%h	Wh
Max	17.31%	27.35%	195.86
Med	1.71%	3.70%	38.07
Ave	2.92%	5.24%	48.61
Min	0.32%	0.00%	29.54
Min/Ave	0.11	0.00	0.61
Ave/Max	0.17	0.19	0.25
Min/Max	0.02	0.00	0.15

Tabla 44: Valores estadísticos de la distribución de valores sobre el plano de trabajo

### 3.4.3.2 Resultados analíticos

Mientras los resultados descriptivos pueden mostrar de forma horaria cómo son las condiciones de iluminación natural e insolación de cada modelo de cálculo, para poder realizar un análisis de los resultados es necesario trabajar con los valores de los indicadores [Tabla 45].

Expresión	Resultado	Dato de origen	Programa	Procedimiento
	Suficiencia de Iluminancia Natural Difusa (% wp) DSd	Factor de Iluminación Natural «*.daylight_factor.DA»	DAYSIM	Determinación de $DF_{cb\ min}$ mediante la obtención de $E_{d,h,med}$ del archivo climático en Microsoft Excel. Análisis mensual y anual de %wp que supera dicho valor mínimo en Microsoft Excel
Gráfica de línea mensual y anual	Suficiencia de Iluminancia Natural Global y Mantenida (% wp y % h) DSg y DSm	Iluminancia horaria en cada punto «DDMh.DA»	DAYSIM	Análisis horario de iluminancias en el plano de trabajo que superan un valor mínimo en MATLAB Análisis mensual y anual de %wp y %h que se supera un determinado valor mínimo en Microsoft Excel
	Insolación Excesiva (% h) SHGe	Ganancias solares a través de las ventanas (kW) Hoja: «SHG»	DesignBuilder	Determinación del valor límite en función de la superficie de hueco (W) en Microsoft Excel. Análisis mensual y anual de % de valores que superan dicho valor límite en Microsoft Excel
Gráfica de barras acumuladas mensual y anual	sUDI<100 sUDI 100-300 sUDI 300-500 sUDI 500-3000 sUDI>3000 (% wp)	Iluminancia horaria en cada punto «DDMh.DA»	DAYSIM	Análisis horario de iluminancias en cada rango en el plano de trabajo en MATLAB Mediana mensual de %wp en cada rango en Microsoft Excel

Tabla 45: Resultados analíticos: Indicadores, formato de expresión, datos de origen, programas de obtención y procedimiento seguido.

#### Discriminación de valores horarios diurnos

Tanto los datos de *ganancias solares* contenidos en la hoja de cálculo «SHG» como las series temporales que componen el archivo «DDMh.DA» contienen 8760 valores horarios, es decir, contienen valores para todas las horas anuales, diurnas y nocturnas [Tabla 45].

Para realizar el análisis de las condiciones de iluminación natural e insolación que presenta el modelo de cálculo es necesario seleccionar los resultados correspondientes a las horas diurnas, de forma que los valores de las horas nocturnas no distorsionen los resultados de análisis.

Para ello se toma el archivo climático de la localidad como elemento de referencia y capaz de filtrar las horas diurnas de las nocturnas en base a los datos contenidos en el mismo sobre *Iluminancia Horizontal Difusa*, de forma que si este valor es “0” se considera como hora nocturna. La aplicación de este criterio se realiza mediante un formato condicional en la hoja de cálculo correspondiente, de forma que para las horas nocturnas no aparece valor numérico.

```
=SI(prueba lógica, [valor si verdadero], [valor si falso])  
=SI([ilum horiz dif archivo climático]=0,"-",INDICE(matriz,[nºfila],[nºcolumna]))
```

Orden programación 13: Obtención de los valores horarios diurnos de las series temporales contenidas en el archivo «DDMh.DA»

### **Suficiencia de Luz Natural Global, Mantenida y Difusa**

El *criterio de Suficiente Luz Natural* establece que un espacio puede considerarse suficientemente iluminado naturalmente si el 50% del plano de trabajo alcanza un nivel de iluminación de 300 lux durante, al menos, el 50% del periodo temporal considerado, en este caso, las horas diurnas. Según la *IESNA* [126], la *Autonomía Espacial de Luz Natural (sDA)* es aceptable si es mayor o igual al 55% del plano de trabajo, siendo preferible que sea mayor o igual al 75% del plano de trabajo.

En el periodo de transición en el que nos encontramos, es importante no sólo señalar los valores que se obtiene mediante la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)*, expresada a partir de los perfiles anuales de iluminancias horarias de cada punto del plano de trabajo, sino que es igualmente relevante mostrar los resultados que se obtienen aplicando el mismo criterio al concepto de *Factor de Iluminación Natural (DF)*, es decir, a partir de la componente difusa de la iluminación natural. La aplicación del *criterio de Suficiente Luz Natural* da lugar a la *Suficiencia de Iluminación Natural Global (DSg)*, a la *Suficiencia de Iluminación Natural Mantenida (DSm)* y a la *Suficiencia de Iluminación Natural Difusa (DSd)*, tal como se ha visto anteriormente.

A través de *MATLAB* se ha obtenido una serie temporal *DSg* en la que cada valor horario representa el porcentaje del plano de trabajo que se encuentra en dicho instante con una iluminancia igual o mayor a un nivel mínimo. En este caso el nivel mínimo fijado ha sido de 300 lux. Estos valores, que forman parte del archivo «DDMh.DA», se han copiado en la hoja de cálculo «DDMh» y se les ha aplicado un tratamiento condicional para seleccionar los valores correspondientes a las horas diurnas de los correspondientes a las horas nocturnas [Tabla 45].

Una vez aplicado el *criterio de Suficiente Luz Natural*, se realizan dos tipos de análisis distintos que dan lugar a los dos aspectos de la *Suficiencia Espacial de Iluminación Natural*:

1. Qué porcentaje del plano de trabajo alcanza el requisito de iluminancia el 50% de las horas diurnas: *Suficiencia de Iluminación Natural Global (DSg)*
2. Qué porcentaje de las horas diurnas cumple con el requisito de iluminancia en al menos el 50% del plano de trabajo: *Suficiencia de Iluminación Natural Mantenida (DSm)*

El primer enfoque aporta información cuantitativa sobre el área del plano de trabajo que alcanza 300 lux durante la mitad de las horas diurnas. *Para considerar un espacio iluminado naturalmente, por tanto, el objetivo es conseguir que dicho porcentaje del plano de trabajo sea como mínimo el 50%*. El segundo enfoque aporta información temporal sobre los requisitos de iluminancia y de cobertura espacial, por lo que habla del mantenimiento de las condiciones de iluminación natural en el tiempo. *Para considerar un espacio iluminado naturalmente, el objetivo es conseguir que dicho número de horas sea al menos la mitad de las horas diurnas.*

Frente a determinar un único valor anual que no permite apreciar la evolución de las condiciones de iluminación natural del espacio, se opta por la adquisición de los valores mensuales, aportando mayor información, pero sin ser de tal entidad que no pueda ser manejable.

La obtención de los valores mensuales y anuales del porcentaje del plano de trabajo que alcanza 300 lux en el mismo instante durante el 50% de las horas diurnas, supone la obtención del valor central del conjunto de resultados diurnos, es decir el cálculo de la mediana del conjunto de valores.

```
=MEDIANA([valores diurnos mes X])
```

Orden programación 14: Obtención de los valores mensuales de  $DSg$

La obtención de los valores mensuales y anual del porcentaje de horas en que se obtiene que la mitad del plano de trabajo alcanza en el mismo instante una iluminancia de 300 lux supone la repercusión sobre el número de horas diurnas del periodo considerado del número de horas en que el resultado del análisis horario realizado en *MATLAB* es mayor del 50% (0'5). Este valor se obtiene mediante la aplicación de un formato condicional:

```
=CONTAR.SI([valores diurnos mes X], ">=0.5")/[nºhoras diurnas mes X]
```

Orden programación 15: Obtención de los valores mensuales de  $DSm$

Por otro lado, la obtención de la *Suficiencia de Iluminación Natural Difusa*, al utilizar los resultados de *iluminancia difusa* en forma de *Factor de Iluminación Natural*, y para que este indicador siga presente en el proceso de transición actual, se basa en la determinación del porcentaje del plano de trabajo (%wp) que alcanza o supera un determinado valor mínimo de Factor de Iluminación Natural.

Este valor mínimo de  $DF_{cb\ min}$  mensual y anual debe ser tal que asegure la obtención de un nivel de iluminación de 300 lux durante el 50% de las horas diurnas. La determinación, por tanto, de dicho valor mínimo se basa en la obtención del valor central de *iluminancia horizontal difusa exterior* ( $E_{d,h\ med}$ ) en cada periodo considerado (mes o año) a través del análisis de los datos recogidos en el archivo climático de la localidad correspondiente [Ver Anexo A].

Con dicho valor y teniendo fijado el objetivo luminotécnico (300 lux) se define el valor mínimo mensual y anual de  $DF_{cb\ min}$  en base a las condiciones climáticas locales [Tabla 46].

month	50% Diff	E <sub>h,g,med</sub>	DFcb 100	DFcb 300	DFcb 500	DFcb 750
January	50.54%	11290	0.89%	2.66%	4.43%	6.64%
February	49.40%	13000	0.77%	2.31%	3.85%	5.77%
March	50.00%	18100	0.55%	1.66%	2.76%	4.14%
April	50.56%	22300	0.45%	1.35%	2.24%	3.36%
May	50.54%	21490	0.47%	1.40%	2.33%	3.49%
June	50.28%	23700	0.42%	1.27%	2.11%	3.16%
July	50.00%	21100	0.47%	1.42%	2.37%	3.55%
August	50.54%	21700	0.46%	1.38%	2.30%	3.46%
September	50.83%	23300	0.43%	1.29%	2.15%	3.22%
October	50.27%	17500	0.57%	1.71%	2.86%	4.29%
November	50.83%	12850	0.78%	2.33%	3.89%	5.84%
December	50.27%	11400	0.88%	2.63%	4.39%	6.58%
Annual	50.14%	19000	0.53%	1.58%	2.63%	3.95%

Tabla 46:  $DF_{cb\ min}$  mensual y anual en base a los valores de *iluminancia horizontal difusa exterior* ( $E_{d,h\ med}$ ) con una frecuencia diurna de aproximadamente de el 50% para las condiciones climáticas de Sevilla. [Anexo A]

Al ser un valor relativo, los valores  $DF_{cb}$  son invariantes en el tiempo, por lo que los resultados de *Suficiencia de Iluminación Natural Difusa* se obtienen de analizar el porcentaje del plano de trabajo que en cada periodo alcanza o supera el valor  $DF_{cb\ min}$ . Esto se lleva a cabo mediante la aplicación de un formato condicional:

```
=CONTAR.SI([valores DF], ">DFmin,mesX")/[nºsensores]
```

Orden programación 16: Obtención de los valores mensuales de *DSd*

La aplicación del *criterio de Suficiente Luz Natural*, por tanto, da lugar a tres valores diferentes en cada periodo considerado:

month	Daylight Sufficiency		
	Diffuse % wp	Global % wp	Maintained % h
January	29.61%	96.79%	74.19%
February	34.84%	98.22%	77.71%
March	52.20%	97.98%	71.03%
April	63.85%	97.38%	76.98%
May	62.07%	96.67%	72.69%
June	67.42%	96.43%	72.67%
July	61.36%	96.43%	72.90%
August	62.90%	97.38%	76.01%
September	66.47%	98.45%	75.26%
October	50.06%	98.34%	72.58%
November	34.36%	96.67%	68.42%
December	30.20%	97.38%	70.44%
Annual	54.93%	97.38%	73.48%

Tabla 47: Valores mensuales y anuales de *Suficiencia de Luz Natural Global, Mantenida y Difusa* del modelo de referencia. En color los valores extremos.

### Iluminancia Natural Útil Simultánea

A través de *MATLAB* se han obtenido cinco series temporales que forman el esquema *Iluminancia Natural Útil Simultánea (sUDIrange)* en las que cada valor horario representa el porcentaje del plano de trabajo que se encuentra en dicho instante con una iluminancia comprendida dentro de un determinado rango de iluminancias.

Estos valores, que forman parte del archivo «*DDMh.DA*», se han copiado en la hoja de cálculo «*DDMh*» y se les ha aplicado un tratamiento condicional para seleccionar los valores correspondientes a las horas diurnas de los correspondientes a las horas nocturnas [Tabla 45].

Al tratar de representar en una sola gráfica el porcentaje horario del plano de trabajo que se encuentra en cada rango de iluminancia definido, es decir, la representación de las cinco series temporales *sUDI*/nos encontramos con que es imposible realizar una lectura cómoda de la gráfica:

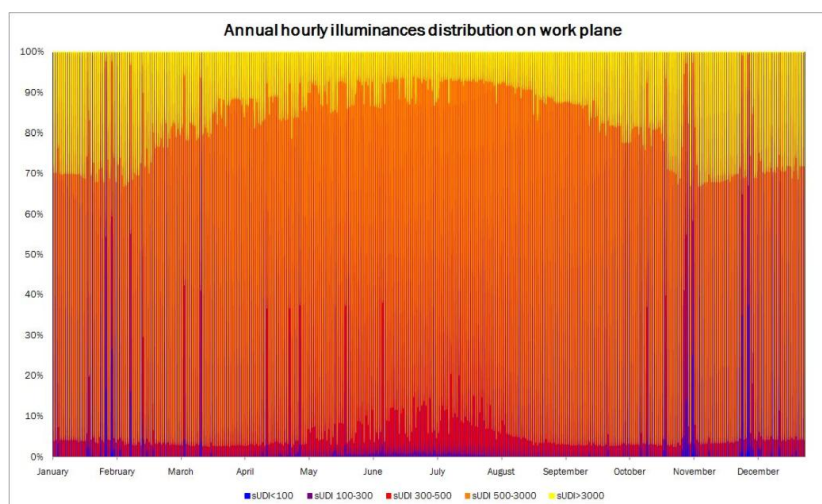


Figura 247: Distribución de iluminancias horarias en los diferentes rangos útiles. P.M. Esquivias

Ante dicha dificultad, similar a la encontrada cuando se ha trabajado con la representación gráfica de los valores horarios de simulación energética, se toma la decisión de representar y analizar estos valores de forma mensual, tal como suele ser habitual también en el ámbito energético.

Siguiendo con el criterio del rango temporal, de forma que se puedan correlacionar los datos de *Suficiencia de Luz Natural Global* con los de *Iluminancia Natural Útil Simultánea*, se obtiene la mediana de los valores en cada rango de iluminancias de cada mes y en rango anual.

```
=MEDIANA([valores diurnos mes X])
```

Orden programación 17: Obtención de los valores mensuales de sUDI

De esta forma se obtiene el valor central del porcentaje del plano de trabajo que se encuentra en cada rango de iluminancia de forma mensual y anual, de mayor representatividad que el valor medio [50]:

	sUDI <sub>&lt;100</sub> med/mth	sUDI <sub>100-300</sub> med/mth	sUDI <sub>300-500</sub> med/mth	sUDI <sub>500-3000</sub> med/mth	sUDI <sub>&gt;3000</sub> med/mth
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp
January	0.00%	0.48%	4.99%	63.50%	14.39%
February	0.00%	1.43%	4.64%	65.76%	15.28%
March	0.00%	0.71%	4.99%	68.37%	10.34%
April	0.00%	2.26%	9.57%	54.99%	7.13%
May	0.00%	2.50%	14.98%	53.51%	3.69%
June	0.00%	3.57%	19.92%	54.52%	1.19%
July	0.00%	3.33%	19.62%	52.20%	1.55%
August	0.00%	1.66%	11.95%	54.99%	5.83%
September	0.00%	1.19%	5.11%	73.13%	11.00%
October	0.00%	1.13%	4.22%	66.35%	14.74%
November	0.00%	1.90%	4.99%	60.05%	14.86%
December	0.00%	1.19%	5.23%	63.97%	14.51%
Annual	0.00%	2.14%	9.51%	58.50%	6.06%

Tabla 48: Mediana de valores mensuales y anuales de % del plano de trabajo del modelo de referencia que se encuentra en el mismo instante en un determinado rango de iluminancias. En color los valores extremos.

**Insolación excesiva**

Mientras no se obtenga más información que correlacione la cantidad de calor que entra en el espacio a través de los huecos exteriores debido a la radiación solar directa y las condiciones de deslumbramiento y sobrecalentamiento del espacio, se ha optado por definir un *valor máximo de irradiancia de 150 W/m<sup>2</sup>*.

Este valor permite asegurar con cierta certeza que, al ser alcanzado en un espacio sin aire acondicionado, el usuario se encuentra en unas condiciones de desconfort tales como para dejar su puesto de trabajo y activar los dispositivos de protección solar que tenga disponibles con el fin de bloquear la entrada de la *radiación solar directa* en el espacio.

Los resultados de simulación energética aportan información sobre las *ganancias solares a través de los huecos exteriores* de forma horaria expresada en vatios (W) y se han copiado en la hoja de cálculo «SHG» [Tabla 45].

Sabiendo el área de los huecos exteriores presentes en el modelo de cálculo y el *factor solar o coeficiente de ganancias solares*, el *criterio de irradiancia límite* puede ser expresado como un valor

de ganancia solar límite multiplicando el valor de *irradiancia* por la suma de las superficies de huecos y por su *coeficiente de ganancia solar*.

límite W/m <sup>2</sup>	límite W
150.00	110.74

Tabla 49: Valor de ganancia solar límite para el modelo de referencia

La obtención del indicador *Insolación Excesiva (SHGe)* en cada periodo considerado, mensual y anual, se basa en la aplicación de un tratamiento condicional a los valores diurnos de ganancia solar térmica resultado de la simulación energética del modelo de cálculo.

```
=CONTAR.SI([valores diurnos mesX], ">=[SHGlim]"/[n°horas diurnas mesX])
```

Orden programación 18: Obtención de valores mensuales de *SHGe*

Por lo que teniendo el porcentaje de horas diurnas en las que se obtienen unas ganancias solares mayores o iguales a una irradiancia equivalente a 150 W/m<sup>2</sup> para cada mes y el porcentaje anual, se puede obtener la correlación entre las ganancias solares y la probabilidad de deslumbramiento calculando el valor mensual y anual de *sUDI<sub>>3000</sub>* que corresponde con el percentil de *SHGe* (%h) de cada periodo mediante la función percentil:

```
=PERCENTIL(matriz, k)
```

Orden programación 19: Obtención del valor mensual *sUDI<sub>>3000</sub>* para el percentil de horas de *SHGe*

Siendo la matriz igual al conjunto de valores horarios correspondientes a cada periodo de estudio, mensual o anual, y k es el valor de percentil en el rango de 0 a 1.

De esta forma se obtiene la evolución mensual y el valor anual de las condiciones de insolación del modelo y el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia simultánea mayor de 3000 lux (probabilidad de deslumbramiento) que se obtiene para el mismo porcentaje de horas:

month	SHGe (% h)	sUDI <sub>&gt;3000</sub>
January	64.22%	24.26%
February	67.83%	19.06%
March	62.97%	12.22%
April	50.50%	7.25%
May	41.08%	0.31%
June	38.67%	0.00%
July	40.86%	0.00%
August	50.45%	5.83%
September	60.05%	11.77%
October	58.06%	16.65%
November	57.89%	17.95%
December	62.89%	23.75%
Annual	53.43%	9.16%

Tabla 50: Valores de *SHGe* del modelo de referencia y su relación con *sUDI<sub>>3000</sub>*. En color los valores extremos.



### 3.5 Expresión de los resultados

El resultado de las diferentes simulaciones realizadas sobre los 119 modelos de cálculo da lugar a una gran base de datos de *iluminancia* en formato horario (8760 valores por cada sensor del plano de trabajo de cada modelo), de valores de *Factor de Iluminación Natural (DF)* (tantos valores como sensores del plano de trabajo por cada modelo), de *ganancias solares a través de los huecos exteriores (SHG)* en formato horario (8760 valores por cada modelo), de *horas de soleamiento* (tantos valores como sensores del plano de trabajo por cada modelo) y de *radiación solar incidente* (tantos valores como sensores del plano de trabajo por cada modelo).

Para que esta información sea de utilidad, pueda manejarse fácilmente, muestre las condiciones de iluminación natural e insolación del espacio y sea comprensible, es necesario elaborar y obtener los indicadores resultantes de unificar el rango temporal de cálculo, la unidad de medida, la unidad dimensional de análisis y aplicar los *critérios de Suficiente Luz Natural, Rangos de Iluminación Útiles para el desarrollo de diferentes tareas visuales e Insolación excesiva*.

La exposición de los resultados comprende varios niveles y tipos de resultados. A nivel individual se obtienen, a partir de los datos de las simulaciones, resultados de tipo descriptivo y de tipo analítico, mientras que a nivel paramétrico y global sólo se muestran resultados analíticos. Los resultados analíticos individuales se basan en los resultados descriptivos, y los resultados analíticos paramétricos y globales se basan en los resultados analíticos individuales.

Como se puede observar, la síntesis de la información útil y representativa de cada modelo, compone en sí misma una gran base de datos de resultados de investigación. Por eso, en la concepción del experimento no sólo ha estado presente la obtención de esta información sino también cómo se iban a expresar, ya que aunque estos indicadores ya forman parte de un primer proceso de síntesis de la información primaria, el conjunto sigue siendo de gran entidad por lo que la base de datos de indicadores no resulta operativa.

Por tanto, para organizar y presentar los indicadores de forma metódica y seriada, en el formato que mejor expresen su potencial, se ha procedido a realizar una siguiente fase de síntesis de resultados de investigación mediante la elaboración de una «*ficha síntesis-análisis*» por cada modelo de cálculo [Anexo B], con la intención de que no sea sólo la exposición ordenada de los resultados de investigación obtenidos, sino que también incluya el análisis individual de las condiciones de iluminación natural e insolación del modelo, así como información descriptiva de las características del mismo.

Uno de los objetivos de estas fichas es que cada una de ellas sea independiente, conteniendo toda la información relativa al modelo individual, de forma que el conjunto de todas las fichas (119) forme un catálogo de diferentes opciones de diseño arquitectónico. Por otro lado, la elaboración de estas fichas también se constituye como un medio para facilitar el análisis transversal por cada serie (parámetro de estudio) o grupos de series de cálculo, por lo que son tanto un fin como un medio.

Cada ficha individual se compone de cuatro páginas (2 formatos DIN A4 a doble hoja) en las que se organiza la información de la siguiente manera:

1. Descripción paramétrica del modelo. Una vez fijados todos los parámetros de estudio y conocida la incidencia de cada uno de ellos sobre otros parámetros secundarios, se elabora una hoja donde se recopilen de forma organizada todos los parámetros involucrados en esta investigación y el valor que adopta en el modelo individual.

Esta información se organiza en diferentes cuadros que corresponden con los parámetros involucrados en las condiciones exteriores del modelo (localización, orientación y presencia de obstrucciones frontales en el entorno), las condiciones espaciales (características geométricas del modelo, de coeficientes de reflexión y del plano de trabajo), las características de sus huecos (geométricas y propiedades) y las características de los dispositivos de protección solar fijos.

Para distinguir los parámetros «principales» de los «secundarios», los parámetros derivados de los parámetros primarios aparecen sombreados. Para localizar cuál es el parámetro que se ha modificado y su repercusión sobre los demás parámetros, éstos aparecen de color diferente y además, el parámetro de estudio aparece en negrita.

2. Exposición gráfica de resultados descriptivos. En esta segunda página, reverso del primer DIN A4, se muestran los resultados en formato gráfico, mostrando en primer lugar la distribución sobre el plano de trabajo de la luz natural, en su vertiente difusa (*Factor de Iluminación Natural*) y su vertiente directa (*Horas de Soleamiento*) como un medio de expresión cualitativa [Figura 240].

En segundo lugar, siguiendo con la exposición de resultados relativos a las condiciones de iluminación natural, se muestra la evolución horaria anual del porcentaje del plano de trabajo que se encuentra en el mismo instante en un rango de iluminancia útil para el desarrollo de la mayor parte de las tareas visuales ( $sUDI_{300-3000}$ ) [Figura 242].

Por último, se muestran los resultados relativos al aspecto térmico de la iluminación natural del espacio en forma de mapa temporal de las *ganancias solares* que se obtienen en cada hora del año [Figura 243] y la distribución sobre el plano de trabajo de la *radiación solar incidente* como un indicativo no sólo de la incidencia directa (*horas de soleamiento*) sino de la intensidad de la misma [Figura 241].

3. Exposición de resultados analíticos: gráfica de análisis y valores mensuales y anuales. En esta parte de la ficha se muestran los valores y gráficas resultantes del tratamiento estadístico de los resultados de simulación, así como las gráficas de análisis.

En primer lugar se muestran los valores extremos y de tendencia central, así como diferentes parámetros que expresan la uniformidad, de la distribución de los valores de *Factor de Iluminación Natural*, *Horas de soleamiento* y *Radiación solar incidente* sobre el plano de trabajo.

En segundo lugar, la gráfica de análisis espacio-temporal de la *Suficiencia Espacial de Iluminación Natural*.

Por último se muestra la gráfica de análisis mensual de los indicadores obtenidos tras aplicar los criterios de *Rango de Iluminancia Útil* para el desarrollo de las tareas visuales, de *Suficiente Luz Natural* y de *Insolación excesiva*. Además, para facilitar la lectura de la gráfica de análisis se muestran los valores obtenidos para cada indicador en base mensual, resaltando los valores extremos, incluyendo también el valor anual, que sirve de base para el análisis de la serie o de grupos de series.

4. Análisis de los resultados. En el reverso de esta página se encuentra un cuadro de texto donde se recoge de forma escrita el análisis de los resultados obtenidos, estructurado en seis aspectos.

A nivel de serie es necesario volver a realizar otro ejercicio de síntesis, de forma que pueda entenderse la evolución y el impacto de la modificación del parámetro de estudio. La exposición de

la evolución de cada uno de los indicadores requiere de un valor único representativo por cada uno de ellos. En este caso, el valor anual de cada indicador facilita la comparación de los diferentes resultados obtenidos con cada modelo de cálculo.

De esta forma, para realizar el análisis de resultados obtenidos para todos los modelos que muestran la variación de cada uno de los parámetros de estudio se muestra el análisis estadístico en base a los criterios de análisis en base anual.

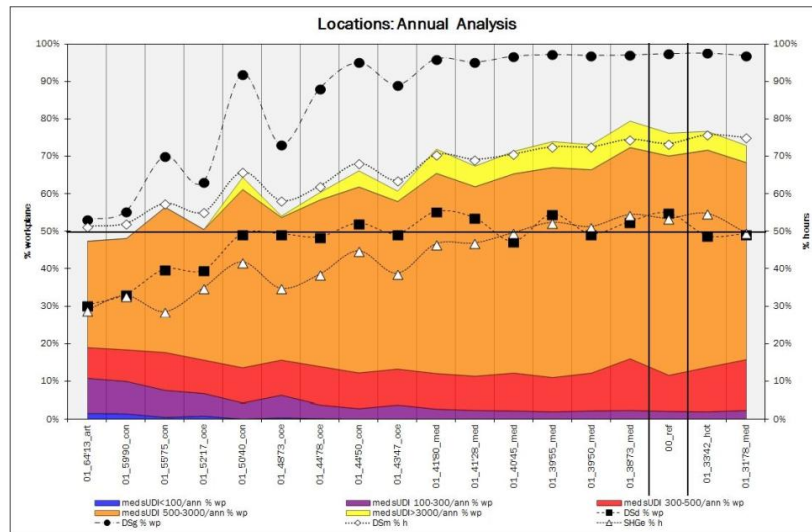


Figura 248: Gráfica de análisis anual de la serie «Localización» (serie 01)

Con estos datos y siguiendo los mismos criterios y códigos de representación que las gráficas de análisis en base mensual de los modelos individuales, se resumen en una gráfica de análisis el valor que toma cada indicador en cada uno de los modelos, ordenados de menor a mayor en el eje de abscisas insertando los resultados correspondientes al modelo de referencia en el lugar que le corresponde dentro de la serie [Figura 248].

Considerando que la iluminación natural útil simultánea suficiente comprende un rango de iluminancias de entre 300 y 3000 lux, se expone en gráfica de barras los valores medianos anuales para los diferentes rangos de iluminación natural útil simultánea, unificando el rango de iluminación suficiente. De esta forma se observa otra faceta que describe las condiciones de iluminación natural del plano de trabajo, clasificado según su valor de iluminación [Figura 249].

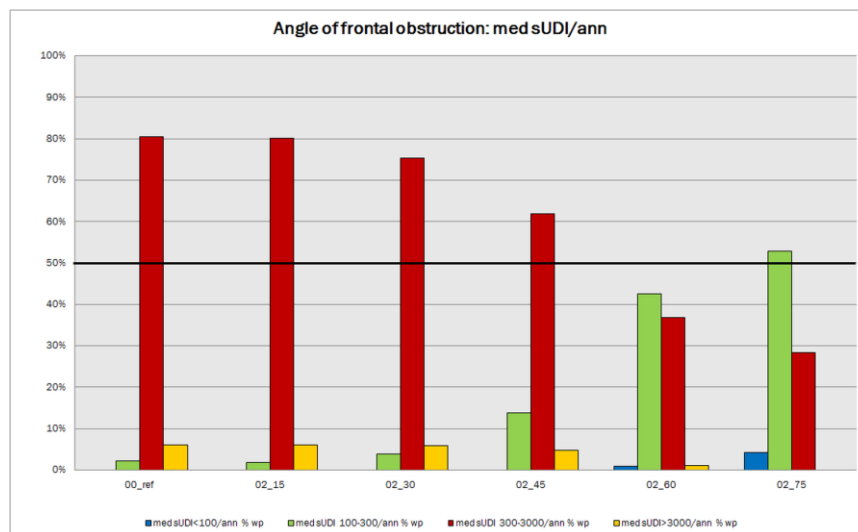


Figura 249: Gráfica de análisis del indicador sUDI de la serie «Elementos del entorno» (serie 02)

Además de esta exposición de resultados anuales, para mostrar con más claridad las diferencias respecto al modelo de referencia se obtiene la proporción que guardan cada uno de los valores resultantes de cada indicador respecto a los resultados obtenidos en el modelo de referencia y se muestran mediante una gráfica de línea donde el eje de abscisas muestra los modelos de la serie ordenados de menor a mayor, con el modelo de referencia en el lugar que le corresponda, y el eje de ordenadas presenta dichos coeficientes de mayoración (>1) o minoración (<1) de los resultados del modelo de referencia correspondientes a cada modelo e indicador.

Debido a la cantidad de indicadores y de modelos que se manejan en algunas series, este tipo de gráfica da lugar a dos gráficas diferentes: una para mostrar las diferencias en los indicadores de *Iluminancia Natural Útil Simultánea (sUDI)* [Figura 250], y otra para mostrar las diferencias respecto al modelo de referencia de los indicadores de *Suficiencia de Luz Natural Global, Mantenido y Difusa y de Insolación excesiva (DSg, DSm, DSd y SHGe)* [Figura 251]. Además, en algunas series se crean otras gráficas de análisis que pueden complementar el análisis de las mismas.

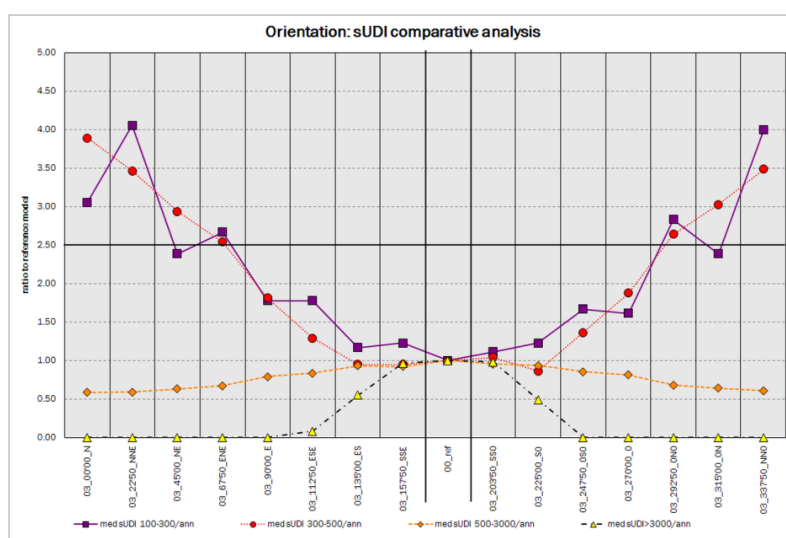


Figura 250: Gráfica de análisis comparativo de *sUDI* de la serie «Orientación» (serie 03)

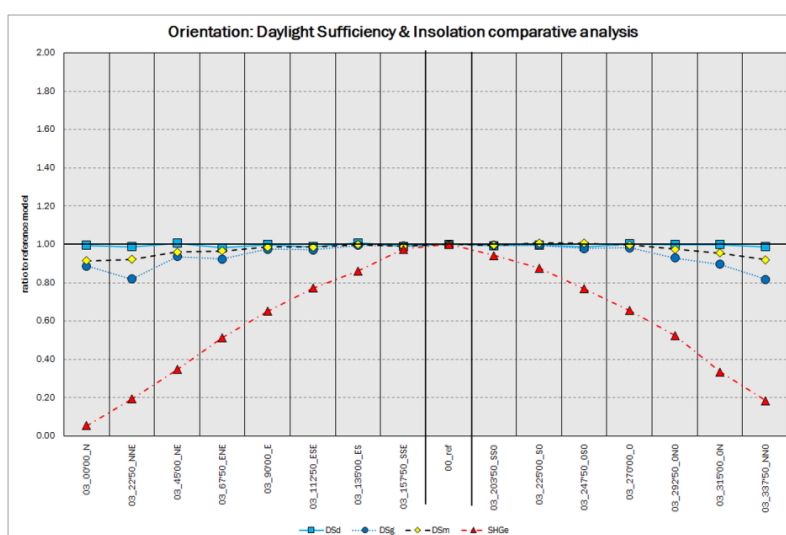


Figura 251: Gráficas de análisis comparativo de *DSg*, *DSm*, *DSd* y *SHGe* de la serie «Orientación» (serie 03)

A continuación, considerando los indicadores más representativos y/o con mayor variación en la serie se muestran gráficas de evolución mensual de varios modelos de la serie para así apreciar el comportamiento mensual del indicador en los modelos que representan el rango de variación.

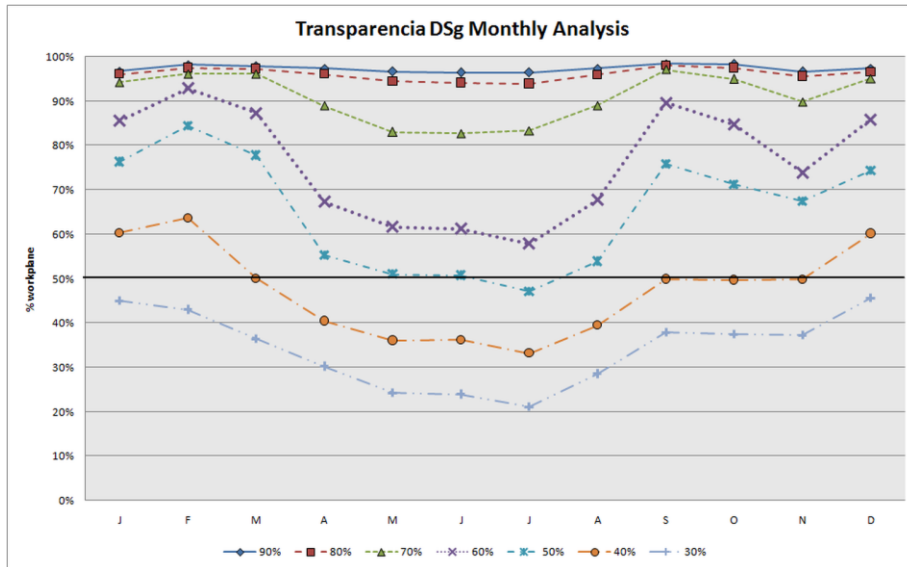


Figura 252: Gráfica de evolución mensual del indicador DSg para la serie «Transparencia» (serie 05)

Una vez realizado el análisis de los valores medianos anuales por cada serie de cálculo se procede a realizar el análisis de los mismos valores pero por cada indicador. Para ello, en cada serie se obtiene el valor máximo, mediano y mínimo de cada indicador para conocer el rango de variación que obtiene cada indicador en cada serie y se procede al análisis de estos valores comparándolos con los requisitos establecidos en los criterios de análisis y con el valor del modelo de referencia. De esta forma se obtiene información sobre el impacto, positivo o negativo, de la serie sobre las condiciones iniciales y si se alcanzan los requisitos mínimos o se superan los valores máximos.

El análisis por indicadores se divide en cuatro apartados de indicadores correlacionados. De forma que el primer subcapítulo se refiere a la Suficiencia de Iluminación Natural del espacio, el segundo a la Iluminación Natural Útil simultánea, el tercero al exceso de radiación solar, en sus vertientes lumínica y térmica, y por último el apartado dedicado a la Iluminación natural insuficiente. Por cada indicador se obtiene una gráfica descriptiva del rango de variación de cada serie de cálculo y los correspondientes valores de referencia.

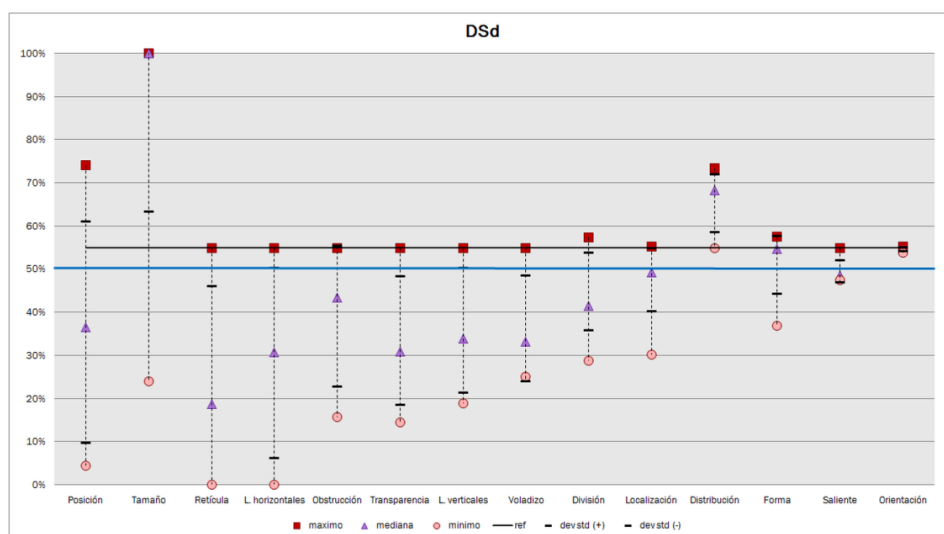


Figura 253: Gráfica de análisis del indicador DSd

Por último se realiza el análisis conjunto del impacto de los parámetros de estudio sobre los nuevos indicadores propuestos mediante el análisis de la desviación estándar de cada serie sobre

cada indicador. La desviación estándar tiene la virtud de ofrecer información sobre el impacto o la dispersión de los valores de cada parámetro según cada indicador dando lugar a una cierta ordenación de los parámetros. Sin embargo, no es posible distinguir si esta dispersión de los valores se realiza en positivo o en negativo, aumentando o disminuyendo de forma global las condiciones de iluminación natural y de insolación. Es por ello que, definidos los criterios de análisis de los diferentes indicadores, se procede a obtener el incremento mínimo y máximo de los tres indicadores más representativos en cada serie respecto a los requisitos. De esta forma se obtiene información sobre si el impacto del parámetro sobre el indicador ha sido positivo o negativo

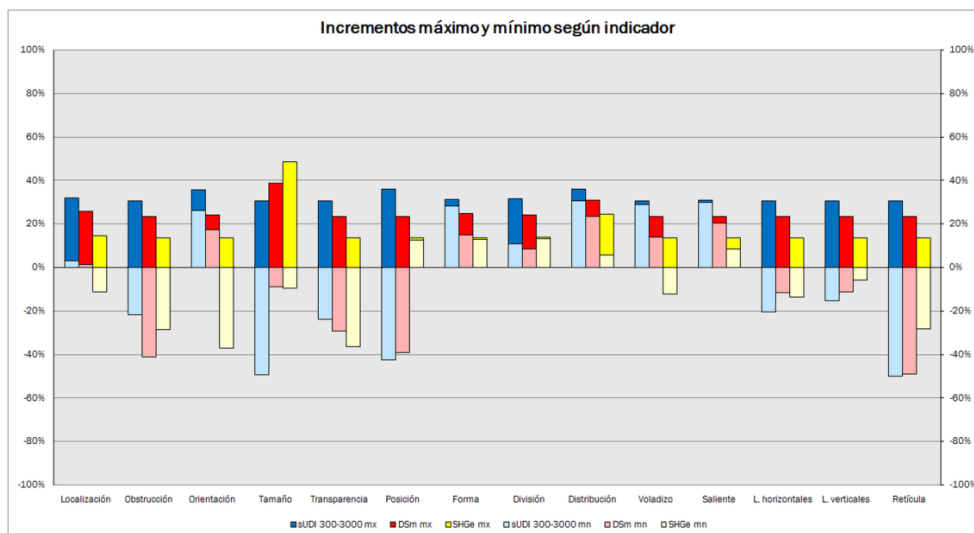


Figura 254: Incrementos máximo y mínimo según indicador.

Como resultado de la diferencia de los incrementos se obtiene finalmente el incremento neto de cada uno de los parámetros. Con estos valores se aprecia el impacto global de cada uno de los parámetros sobre las condiciones de iluminación natural e insolación.

Mientras el análisis de los resultados por serie, por indicador y global se expone en este documento, el análisis de cada modelo individual, dato primario de esta investigación, se realiza en el Anexo B debido, entre otros, a su gran volumen.

Es por ello que a continuación se muestra un ejemplo de las «fichas síntesis-análisis» de los modelos individuales; en este caso la correspondiente al modelo de referencia, por lo que no se resalta ningún parámetro de estudio, ni tampoco ningún parámetro derivado de la modificación del primero:



00\_ref

Datos de entrada

Condiciones exteriores			
<b>Localización</b>		Sevilla (37°42'N) clima mediterráneo	
	Archivo climático	ESP_Sevilla.083910_IWEC.epw	
<b>Orientación</b>		180° (S)	
Obstrucción frontal			
Pendiente (%)	0.00%	Altura (m)	0.000
Ángulo de elevación (°)	0.00°	Distancia (m)	1.000

Condiciones espaciales			
Anchura a (m)	3.00	Sup. Suelo y techo (m2) [a*p]	9.00
Profundidad p (m)	3.00	Sup. Fachada y Opuesta (m2) [a*h]	9.00
Altura h (m)	3.00	Sup. Paredes perpend.(m2) [p*h]	9.00
Volumen (m3)	27.00	Sup. Envolverte (m2)	54.00
Coeficientes de forma		Coeficientes de reflexión	
Compacidad (Volumen/ΣSup.)	0.50	Suelo (%)	20%
Forma Suelo y techo. [a/p]	1.00	Fachada y Opuesta (%)	50%-50%
Forma Fachada y Opuesta [a/h]	1.00	Paredes Perpend. (%) [Izqda-Dcha]	50%-50%
Forma Paredes perpend. [p/h]	1.00	Techo (%)	80%
Plano de trabajo			
Altura (m)	0.80	Nº de puntos de estudio	841

Características del Acristalamiento			
Sup. Ventana (m2)	0.90	Sup. Ventana/Suelo (%)	10.03%
Ancho av (m)	0.950	Sup. Ventana/Fachada (%)	10.03%
Alto hv (m)	0.950	Sup. Ventana/Volumen (%)	3.34%
Factor de forma (av/hv)	1.00	Transmitancia visible (%)	0.8836
Distancia Suelo y Techo [S-T]	1.03-1.03	Transmitancia solar (%)	0.7707
Distancia Paredes [Izqda-Dcha]	1.03-1.03	Coefficiente de Ganancia Solar (%)	0.8180
Nº de ventanas	1.00	Transmitancia Termica (W/m2K)	5.6990
Filas	1.00	Columnas	1.00

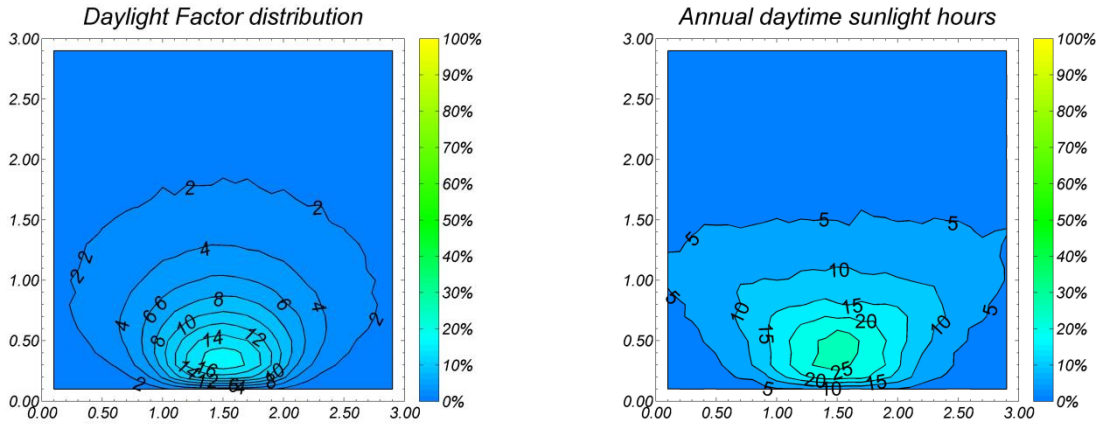
Voladizo		Saliente lateral	
Ángulo de obstrucción (°)	0°	Ángulo de obstrucción (°)	0°
Ángulo de elevación visible (°)	90° (0° a 90°)	Ángulo de azimut visible (°)	180° (-90° a 90°)
Profundidad (m)	0.00	Profundidad (m)	0.00
Lamas Horizontales		Lamas Verticales	
Ángulo de obstrucción (°)	0°	Ángulo de obstrucción (°)	0°
Ángulo de elevación visible (°)	90° (0° a 90°)	Ángulo de azimut visible (°)	180° (-90° a 90°)
Profundidad (m)	0.10	Profundidad (m)	0.10
Separación entre lamas (m)	∞	Separación entre lamas (m)	∞
Nº lamas	0	Nº lamas	0
Retícula lamas		Elementos Verticales	
Ángulo de obstrucción (°)	0°	Ángulo de obstrucción (°)	0°
Ángulo de elevación visible (°)	90° (0° a 90°)	Ángulo de azimut visible (°)	180° (-90° a 90°)
Profundidad (m)	0.10	Profundidad (m)	0.10
Separación entre lamas (m)	∞	Separación entre lamas (m)	∞
Nº lamas	0	Nº lamas	0



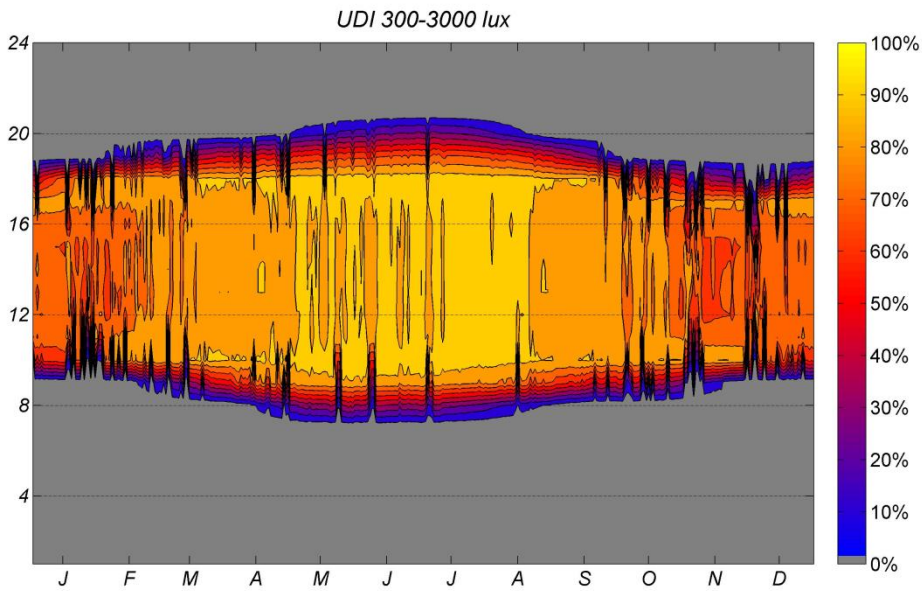
Representación gráfica de la distribución de valores calculados

00\_ref

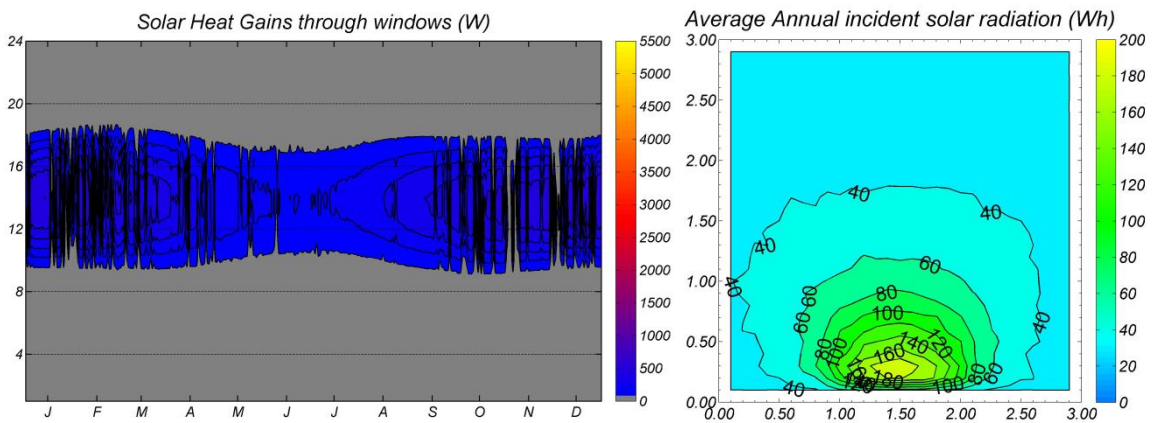
Daylight factor and Annual daytime sunlight hours on the workplane



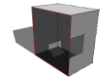
Simultaneous Useful Daylight Illuminances (300–3000 lux): Temporal map



Annual solar radiation: Temporal map and distribution on the workplane





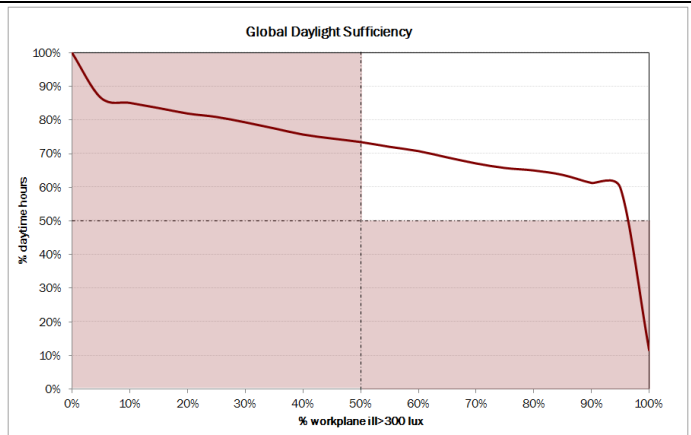


00\_ref

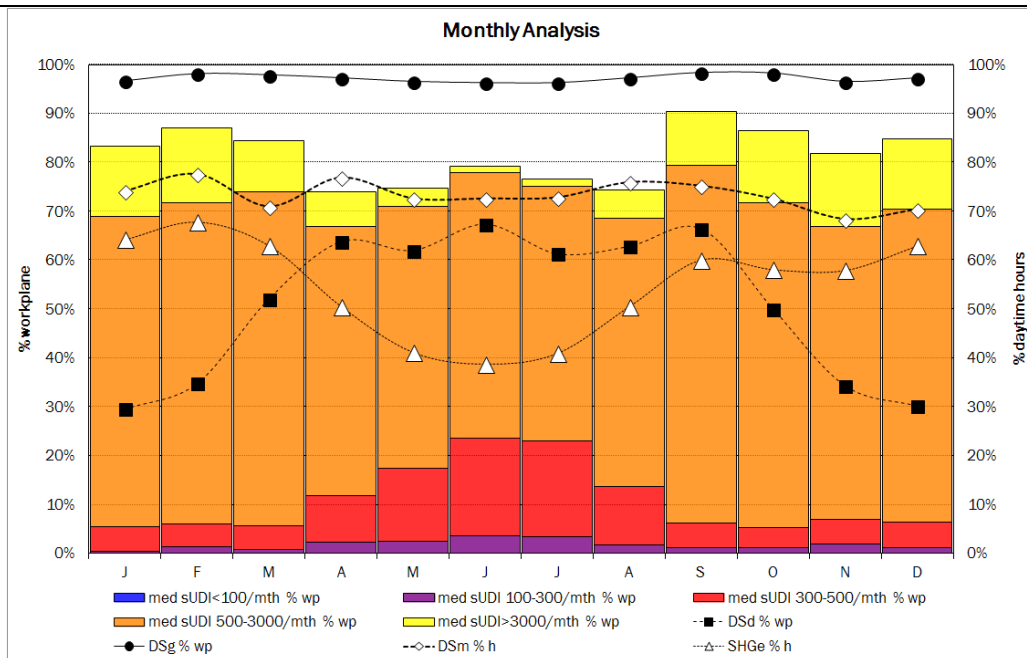
Statistical workplane values

Global & Maintained Daylight Sufficiency

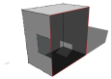
	Daylight Factor	Incident Sunlight	Incident Solar Radiation
	%	%h	Wh
Max	17.31%	27.35%	195.86
Med	1.71%	3.70%	38.07
Ave	2.92%	5.24%	48.61
Min	0.32%	0.00%	29.54
Min/Ave	0.11	0.00	0.61
Ave/Max	0.17	0.19	0.25
Min/Max	0.02	0.00	0.15



Temporal and Workplane Monthly Analysis



	Simultaneous Useful Daylight Illuminances med/mth					Daylight Sufficiency			Solar Gains-e
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	Diffuse	Global	Maintain	SHGe
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
January	0.00%	0.48%	4.99%	63.50%	14.39%	29.61%	96.79%	74.19%	64.22%
February	0.00%	1.43%	4.64%	65.76%	15.28%	34.84%	98.22%	77.71%	67.83%
March	0.00%	0.71%	4.99%	68.37%	10.34%	52.20%	97.98%	71.03%	62.97%
April	0.00%	2.26%	9.57%	54.99%	7.13%	63.85%	97.38%	76.98%	50.50%
May	0.00%	2.50%	14.98%	53.51%	3.69%	62.07%	96.67%	72.69%	41.08%
June	0.00%	3.57%	19.92%	54.52%	1.19%	67.42%	96.43%	72.67%	38.67%
July	0.00%	3.33%	19.62%	52.20%	1.55%	61.36%	96.43%	72.90%	40.86%
August	0.00%	1.66%	11.95%	54.99%	5.83%	62.90%	97.38%	76.01%	50.45%
September	0.00%	1.19%	5.11%	73.13%	11.00%	66.47%	98.45%	75.26%	60.05%
October	0.00%	1.13%	4.22%	66.35%	14.74%	50.06%	98.34%	72.58%	58.06%
November	0.00%	1.90%	4.99%	60.05%	14.86%	34.36%	96.67%	68.42%	57.89%
December	0.00%	1.19%	5.23%	63.97%	14.51%	30.20%	97.38%	70.44%	62.89%
Annual	0.00%	2.14%	9.51%	58.50%	6.06%	54.93%	97.38%	73.48%	53.43%



*Descripción, análisis, observaciones y conclusiones*

---

## 00\_ref

---

Espacio reservado para el análisis de los resultados obtenidos estructurado en los siguientes aspectos

1. **Rango útil de iluminancias (300-3000 lux):**
2. **Ganancias Solares a través de la ventana:**
3. **Distribución de valores sobre el plano de trabajo:**
4. **Valores estadísticos superficiales:**
5. **Suficiencia de Iluminación Natural Global y Mantenida:**
6. **Evolución mensual de indicadores:**

---

Tabla 51: Ficha síntesis-análisis del modelo de referencia

### 3.6 Aplicación al diseño arquitectónico

El objetivo final de esta investigación consiste en que los resultados obtenidos sirvan de utilidad para poder diseñar los edificios o realizar su rehabilitación considerando la iluminación natural, como un aspecto relevante de las condiciones de habitabilidad de los espacios.

Como hipótesis de partida se planteaba que una vez conocido el comportamiento relativo de cada uno de los parámetros es posible predeterminar, a partir de la aplicación de los factores de proporcionalidad sobre el modelo de referencia, las condiciones de iluminación natural y de insolación de una realidad arquitectónica compleja.

El procedimiento consiste en analizar las condiciones exteriores del proyecto en su primera fase, es decir, las condiciones climáticas de la localización del proyecto, las posibles orientaciones de las fachadas y el ángulo de obstrucción frontal que tiene cada planta de cada fachada.

Obtenida esta caracterización del proyecto, se multiplican los valores medianos anuales correspondientes al modelo de referencia por los factores de proporcionalidad respecto al modelo de referencia obtenidos para la localización del proyecto. De esta forma se obtienen nuevos valores medianos anuales para cada indicador correspondientes a la localización.

Del mismo modo para cada posible orientación se aplican los factores de proporcionalidad correspondientes obteniendo los valores medianos anuales de cada fachada sin presencia de elementos del entorno, por tanto, a cada planta de cada fachada se le aplica el factor de proporcionalidad correspondiente al ángulo de obstrucción frontal con el que se enfrenta.

Obtenidas las nuevas situaciones de potencial de iluminación natural e insolación por cada orientación y planta del nuevo edificio se procede a determinar el tamaño del hueco necesario para proporcionar una adecuada iluminación natural sin provocar una excesiva insolación del espacio.

De esta forma, mediante los factores de proporcionalidad del tamaño del hueco se puede conocer el margen de variación posible sabiendo que si se elige un tamaño demasiado grande habrá que aplicar los factores de proporcionalidad de aquellos parámetros que contribuyan a reducir las condiciones de iluminación natural e insolación. Sin embargo, si se escoge un tamaño de hueco ajustado, se podrá aplicar los factores de proporcionalidad correspondientes a aquellas estrategias arquitectónicas que matizan las condiciones de iluminación natural e insolación.

Para mostrar la veracidad de esta hipótesis y este procedimiento se realiza la aplicación sobre un caso real y se compara con el resultado obtenido mediante simulación en las mismas condiciones relativas a la localización, las orientaciones y el ángulo de obstrucción frontal que tiene cada planta.

El ejemplo escogido para la aplicación de este procedimiento ha sido el nuevo edificio residencial diseñado por el Atelier Du Pont ubicado en la Rue de Nantes en París.

Este edificio residencial, con forma de L, alberga 20 viviendas sociales, distribuidas entre el cuerpo que forma la fachada principal del edificio y el cuerpo aterrazado que da al jardín interior. El proyecto se inserta en una estrecha parcela rodeada de edificios residenciales medianeros. En este contexto el proyecto cuenta con fachadas acristaladas en tres orientaciones: la fachada principal, hacia la Rue de Nantes, con orientación Nordeste (40°), la fachada del jardín y las viviendas aterrazadas, con orientación Suroeste (220°), y la fachada hacia la medianera, con orientación Noroeste (310°) [Figura 255].

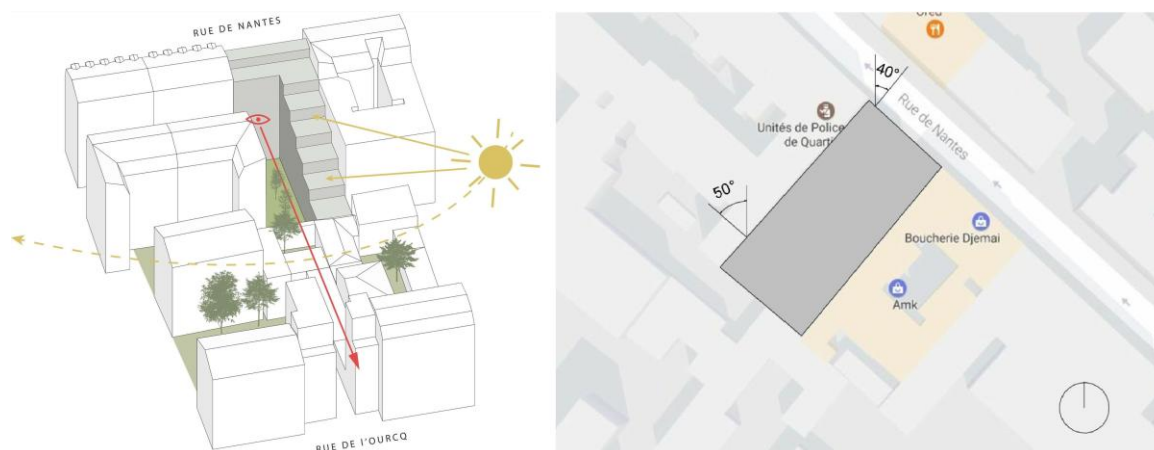


Figura 255: Esquema y situación del edificio residencial 'Gradins-jardins' del Atelier du pont

El edificio, de siete plantas, cuya fachada principal mira a la Rue de Nantes, tiene un edificio frente a la fachada de prácticamente la misma altura. En el ámbito interior se distinguen varias situaciones. Por un lado, la fachada del cuerpo principal sólo tiene como obstrucción frontal más inmediata la tapia de una altura que delimita la parcela. Las viviendas aterrazadas tienen como obstrucción frontal edificios que sobresalen una o dos plantas pero se encuentran a cierta distancia, por lo que no representan una gran obstrucción, salvo para la primera terraza, que se encuentra en la planta segunda. Finalmente la fachada Noroeste mira a una medianera de aproximadamente la misma altura del edificio, separada de la fachada mediante el jardín.

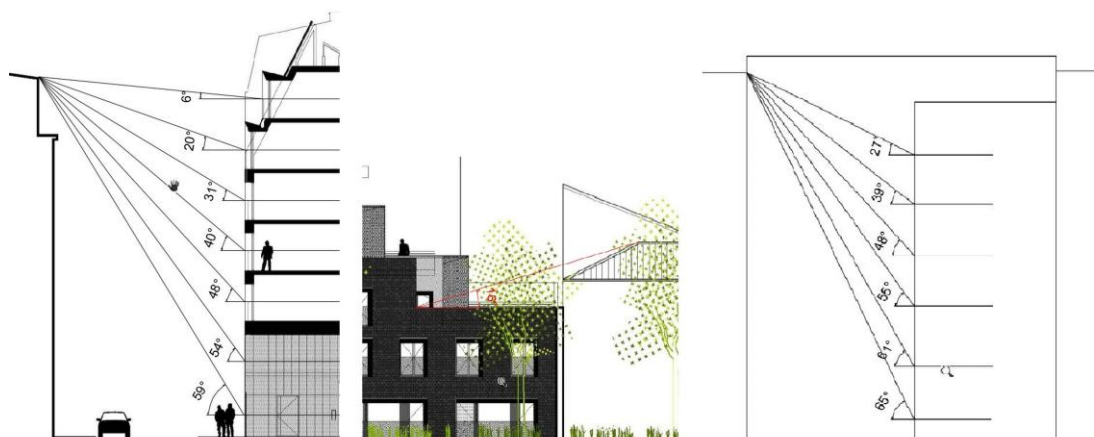


Figura 256: Secciones de las fachadas principal, viviendas aterrazadas y fachada hacia medianera

Si analizamos la fachada principal se observa que las dos primeras plantas tienen un ángulo de obstrucción frontal mayor de  $54^\circ$ , las plantas tercera y cuarta tienen un ángulo de obstrucción de aproximadamente  $45^\circ$ , la quinta planta de  $30^\circ$ , la sexta próximo a  $15^\circ$  y la última planta prácticamente no tiene ángulo de obstrucción frontal.



Figura 257: Vista de la fachada principal y la fachada interior hacia la medianera

Respecto a la fachada Suroeste, las obstrucciones frontales de mayor impacto se presentan en la primera vivienda aterrazada, en la segunda planta, con un ángulo de  $16^\circ$ . El resto de las fachadas, tanto del cuerpo principal como las viviendas aterrazadas, tienen obstrucciones pero demasiado lejanas como para suponer una gran reducción de las condiciones de iluminación natural e insolación de los espacios interiores.



Figura 258: Vista interior del patio. Vista de las fachadas Suroeste del edificio y vista de las obstrucciones

### 3.7 Abstract of the Methodology

---

One of the biggest problems to be faced when addressing daylight in architectural design is that the impact of each design decision on the interior environment is an unknown factor: partly owing to standard requirements, much higher priority tends to be given to heat-related aspects.

Another difficulty resides in the metrics that are used to express direct and diffuse daylighting levels in a space, and their relationship with solar heat gain caused by incoming sunlight.

It is a well-known fact that studies into daylighting in interior spaces are traditionally based on two different approaches: quantitative analysis, expressed using the *Daylight Factor (DF)*, which does not taken into consideration direct sunlight and is only possible when the sky is overcast; and qualitative analysis of sunlight entering a space, conducted by studying the shadows cast, in which neither the brightness of the sunlight nor the light reflected from the sky vault are considered [1]. Essentially, therefore, the two methodologies are incompatible.

Insolation – that is to say, heat loads due to direct sunlight – habitually constitute a component of energy analyses, where complex calculations are made to obtain hourly or sub-hourly values based on climate conditions. This big difference in the accuracy of heat and light values has caused a gap gradually to open up between studies into the heat and light effects of *solar radiation* in architecture.

Also, the appearance in recent years of *Dynamic Daylight Metrics (DDMs)*[13] has made it possible more accurately to obtain daylight values for a space based on local climate conditions. Although the integration of DDMs in professional practice is still an ongoing process, they are gradually replacing the *Daylight Factor*, which has been virtually the only objective indicator of natural light since the middle of the 20th century.

DDMs are obtained through the cumulative analysis of annual hourly illuminances profile, obtained in turn by *Climate-Based Daylight Modelling (CBDM)*.

When attempting to compare the different metrics and their habitual forms of expression, it immediately becomes evident that the time range, dimensional units, magnitudes and units of measurement of each one differ from those of the others. At present, there do exist different ways of describing the different aspects of daylight and insolation in a space, even with the same degree of accuracy, but these methods are totally uncoordinated, with different calculation bases. This makes them very difficult to integrate, thus precluding a global, correlated view of how daylight affects interior conditions in terms of both heat and light.

This inability to evaluate natural light meaningfully in its entirety using one single, integratory method is one of the principal causes of deficient, or unsuitable, designs [1]- a shortcoming that emphasizes the extent to which the study of daylighting has been neglected in Architecture.

### 3.7 Resumen de la Metodología

Uno de los principales problemas a la hora de considerar la luz natural en el proyecto arquitectónico es que se desconoce el impacto de cada una de las decisiones de proyecto en las condiciones interiores, siendo mucho más relevantes los aspectos térmicos, entre otras razones, por exigencias normativas.

Otra de las grandes trabas reside en los indicadores que se utilizan para expresar las condiciones de iluminación natural de un espacio, difusa y directa, y su relación con las condiciones de insolación que provoca la presencia solar en un espacio.

En este sentido es bien conocido que tradicionalmente el estudio de las condiciones de iluminación natural de un espacio se aborda desde dos vertientes distintas: por un lado el análisis cuantitativo expresado mediante el *Factor de Iluminación Natural (DF)*, que no considera la presencia directa del Sol, sólo posible bajo condiciones de cielo completamente nublado; y por otro el análisis cualitativo de la presencia solar en el espacio a través del estudio de las sombras arrojadas, en el que la intensidad del Sol no se considera, así como tampoco la luz proveniente de la bóveda celeste [1]. Por tanto, ambas metodologías son, en esencia, incompatibles.

En cuanto al estudio de las condiciones de insolación, es decir, de las cargas térmicas debidas a la acción directa del sol, éste habitualmente forma parte de los análisis energéticos, con un gran desarrollo computacional para obtener valores horarios o sub-horarios en base a unas condiciones climáticas. Esta gran diferencia en la precisión de los valores térmicos y lumínicos ha provocado un distanciamiento progresivo entre el estudio de los efectos térmicos y lumínicos de la *radiación solar* en la arquitectura.

Por otro lado, la emergencia de los *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural (DDMs)* [13], en los últimos años, permite obtener con mayor precisión las condiciones de iluminación natural en un espacio en base a las condiciones climáticas locales, pero aún se encuentran en proceso de integración en la práctica profesional, desplazando progresivamente al *Factor de Iluminación Natural*, que ha sido prácticamente el único indicador objetivo de iluminación natural desde mediados del siglo XX.

Estos *DDMs* se obtienen a partir del análisis acumulativo en cada sensor del plano de trabajo del perfil anual de iluminancias horarias correspondientes que se obtienen a partir de la *Modelización climática de la Luz Natural (CBDM)*.

A la hora de tratar de comparar los diversos indicadores y su forma de expresión habitual, se pone de relieve que el rango temporal, la unidad dimensional y las magnitudes y unidades de medida de cada uno de ellos es diferente. Es decir, actualmente existen diferentes formas para describir diversos aspectos de la iluminación natural y la insolación de un espacio, incluso con la misma precisión, pero éstas están totalmente descoordinadas, con distintas bases de cálculo, lo cual complejiza la integración de las mismas así como la obtención de una visión global o correlacionada sobre el impacto de la luz natural en las condiciones ambientales interiores, lumínicas y térmicas

Esta incapacidad de poder evaluar significativamente la luz natural en su totalidad en un único método integrador es una de las principales causas de decisiones de diseño deficientes o no adecuadas [1], enfatizando el abandono del estudio de las condiciones de iluminación natural en la arquitectura.

To tackle the problem, this study therefore aims to examine the qualitative and quantitative effects of given design decisions on local climate-based daylighting and insolation. The idea is to use the information acquired to promote passive architectural design strategies which will accommodate both the light and heat aspects of solar radiation entering buildings through openings.

To do so, a set of experiments was designed to study the impact of the different parameters affecting the light conditions in a space. The results from a series of models were compared and contrasted with those of a reference model.

The daylighting and insolation data provided by each variant constitutes a useful aid when taking architectural design decisions at the beginning of the design process, since it offers a better understanding of their impact on interior ambient conditions. This will enrich the design process, making it more environmentally aware and, if the information is used to good benefit as a means of lowering energy demand, improving its energy efficiency.

For purposes of systematization and reproducibility, to allow corroboration and validation by the scientific community and ensure the reliability of the results, the experiment had to be very carefully designed, establishing a methodology capable of fully expounding all the resources and procedures involved.

A list of elements affecting the way solar radiation enters through openings or windows and spreads through a space was obtained from the state-of-the-art. These elements were placed in order of progression from the outside to the inside of the architectural space, starting with the solar radiation levels present at the site location (determined by the local climate conditions) and ending with the sizes of the fixed shading devices.

To limit the scope of the experiment, only those elements deemed to be of greatest relevance were selected as parameters for study.

Nº	Parameter or series	Independent variable	Number of values
<b>CLIMATE CONDITIONS</b>			
1	Climate conditions	Location	18
<b>SITE POTENTIAL</b>			
2	Surrounding elements	Frontal obstruction angle	6
3	Orientation	Angle of orientation	16
<b>ARCHITECTURAL DESIGN</b>			
<b>DAYLIGHTING ELEMENTS: PERIMETER OPENINGS</b>			
4	Size of opening	Window surface/Façade surface	11
5	Translucency of opening	Visible transmittance	7
6	Position of opening	Position of opening on the facade	9
7	Shape of opening	Opening shape factor	15
8	Segmentation of opening	Segmentation of surface (nº rows x nº columns)	13
9	Distribution of openings	Façade surface segmentation and distribution	8
<b>CONTROL ELEMENTS: SOLAR PROTECTION DEVICES</b>			
10	Overhang	Angle of obstruction	5
11	Vertical fin	Angle of obstruction	9
12	Fixed light shelves	Angle of obstruction	13
<b>TOTAL</b>			<b>130 (118+ref)</b>

Table 52: Summary of studied parameters, independent variables and values.



Es por ello que, ante esta problemática, esta investigación se pone como objetivo conocer cómo afectan, cualitativa y cuantitativamente, determinadas decisiones de proyecto sobre las condiciones de iluminación natural e insolación en base a las condiciones climáticas locales (base climática). Con este conocimiento se pretende fomentar un diseño arquitectónico pasivo donde ambos aspectos, lumínico y térmico, de la radiación solar que entra por los huecos se contemplen simultáneamente, aportando una visión integradora.

Para dar respuesta a esta problemática se ha diseñado un conjunto de experimentos donde se ha estudiado el impacto de diversos parámetros involucrados en las condiciones de iluminación de un espacio mediante el análisis comparativo de los resultados de cada modelo respecto a un modelo de referencia.

El análisis de las condiciones de iluminación natural y de insolación que proporciona cada variante supondrá una guía en las primeras fases de diseño a la hora de tomar decisiones de proyecto ya que aportará una mayor información sobre el impacto en las condiciones ambientales interiores y, por ende, el proyecto arquitectónico se enriquecerá y será ambientalmente más consciente, así como energéticamente más eficiente si se aprovecha esta información a favor de un diseño arquitectónico encaminado hacia una menor demanda de energía.

Para permitir la sistematización y reproducibilidad del experimento y, de esta forma, que pueda ser contrastado y validado por la comunidad científica, asegurando la fiabilidad de los resultados, ha sido necesario un adecuado diseño del experimento así como el establecimiento de una metodología que muestre los medios y los métodos empleados en la ejecución del mismo.

Del estado del arte se ha extraído una relación con los elementos que afectan a la entrada y distribución de la *radiación solar* en un espacio a través de sus huecos o ventanas. Éstos se han ordenado del exterior al interior del espacio arquitectónico, partiendo de la disponibilidad de radiación solar de la localización del proyecto, marcada por las condiciones climáticas locales, hasta las dimensiones de los dispositivos fijos de protección solar.

Para acotar la extensión del experimento se han seleccionado los que se consideran de mayor relevancia. Estos elementos constituyen los parámetros de estudio.

Nº	Parámetro o serie de estudio	Variable independiente	Número de valores
<b>CONDICIONES CLIMÁTICAS</b>			
1	Condiciones climáticas	Localización	18
<b>POTENCIALIDAD DEL EMPLAZAMIENTO</b>			
2	Elementos del entorno	Ángulo de elevación de la obstrucción frontal	6
3	Orientación	Ángulo de orientación	16
<b>EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO</b>			
<b>ELEMENTOS DE ADMISIÓN DE LUZ NATURAL: LOS HUECOS EXTERIORES</b>			
4	Tamaño de hueco	Superficie de ventana/Superficie de fachada	11
5	Transparencia del hueco	Transmitancia visible	7
6	Posición del hueco	Posición del hueco en la fachada	9
7	Forma del hueco	Factor de forma del hueco	15
8	División del hueco	División de la superficie (nº filas x nº columnas)	13
9	Distribución de los huecos	División de la superficie y distribución fachadas	8
<b>ELEMENTOS DE CONTROL: LAS PROTECCIONES SOLARES</b>			
10	Voladizo	Ángulo de obstrucción	5
11	Saliente lateral	Ángulo de obstrucción	9
12	Dispositivos de lamas fijas	Ángulo de obstrucción	13
<b>TOTAL</b>			<b>130 (118+ref)</b>

Tabla 52: Resumen de parámetros, variables independientes y valores de estudio.

In the experiment, each parameter corresponded to a calculation series, constituting the independent variable for that series. For each variable, a set of values was established representing the full possible range of values, with each value corresponding to a specific calculation model within its series.

A reference model was also defined, in which the constants for the experiment were pre-established by allocating a given value to each of the study parameters. In each series, one variable from the reference model was modified, and the effect of this change on the parameters that could be influenced by it was monitored and recorded.

The reference model incorporated not only daylighting requirements as laid down in applicable legislative documents, golden rules and by other international institutions, but also standards regulating thermal envelope requirements.

Calculation models were created corresponding to each value for each parameter being studied, providing a total of 119 models, and these were simulated in three different internationally validated calculation programs: a dedicated daylighting analysis program (*DAYSIM*), a dedicated energy analysis program (*DesignBuilder*) and a third tool which performed environmental calculations and also provided a graphic interface for *DAYSIM* (*Ecotect*).

All of the programs are based on internationally recognised, accepted and validated methods and algorithms. Depending on the program in question, the raw data output provided may be expressed in different time scales (yearly, monthly, daily, hourly or sub-hourly), with values corresponding to different dimensional scales (spot, surface or volumetric values).

For each calculation model, *natural illuminance* and *Daylight Factor* values were obtained using a dedicated *Climate-Based Daylight Modelling (CBDM)* program based on the *Radiance* calculation engine, *solar thermal gain through perimeter openings* was quantified using a dedicated *Thermal Balance measuring program* based on the *EnergyPlus* calculation engine, and complementary values like *hours of solar exposure* and *incident solar radiation* were obtained using an ambient environment simulator

	Files generated	Description
DAYSIM data	«*.ill» «*.daylight_factor.DA»	Annual hourly illuminance profile Daylight Factor
DesignBuilder data	Microsoft Excel workbook «nombremodelo.xlsx». Worksheet: «SHG»	Annual profile of hourly solar gain through perimeter windows
Ecotect data	«*_sunlight.txt» «*_ave hourly radiation.txt»	Total sunlight hours Mean hourly incident solar radiation

Table 53: Simulation software data output

The sets of data provided by each different program varied in their units of measurement, time scales and in the dimensional scales employed, so to compare, correlate and analyse them it was necessary to establish a common framework with common calculation bases and design a processing procedure for the primary data calculations, also taking into account the usual means of expressing results.

En el experimento cada parámetro se corresponde con una serie de cálculo, siendo dicho parámetro la variable independiente de la serie. Por cada variable se establece un conjunto de valores representativos de la amplitud del rango. Cada uno de estos valores corresponde con un modelo de cálculo dentro de su serie.

Además, se ha definido un modelo de referencia en el que se han fijado las constantes del experimento reflejado mediante un valor determinado de cada uno de los parámetros de estudio. Sobre el modelo de referencia se ha modificado una variable en cada serie, controlando y registrando su efecto en los parámetros que puedan verse afectados por dicha variación.

En la definición del modelo de referencia no sólo han intervenido los requisitos sobre iluminación natural establecidos por los documentos legislativos, las reglas de oro u otras instituciones internacionales, sino que también se han incluido los requisitos relativos a la envolvente térmica establecidos en la normativa.

Por cada valor dentro de cada parámetro de estudio se ha creado un modelo de cálculo, dando lugar a un total de 119 modelos, que se ha simulado en tres programas de cálculo diferentes, todo ellos validados internacionalmente: un programa específico de cálculo de iluminación natural (*DAYSIM*), otro específico para el cálculo energético (*DesignBuilder*) y un tercer programa de cálculo medioambiental así como de interfaz gráfica para *DAYSIM* (*Ecotect*).

Cada programa específico se basa en métodos y algoritmos de cálculo reconocidos, aceptados y validados internacionalmente. Según el programa, la salida de datos o los datos en bruto que proporcionan puede expresarse en diferentes escalas temporales (anuales, mensuales, diarios, horarios o sub-horarios) y los valores pueden corresponder a diferentes escalas dimensionales (valores puntuales, superficiales o volumétricos).

Por cada modelo de cálculo se obtienen valores de *iluminancia natural* y de *Factor de Iluminación Natural*, obtenidos mediante la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)* utilizando un programa específico basado en el motor de cálculo de *Radiance*, de *ganancia solar térmica a través de los huecos exteriores*, mediante un método basado en el *método del Balance Térmico* utilizando un programa específico basado en el motor de cálculo *EnergyPlus*, y valores complementarios como las *horas de soleamiento* y la *radiación solar incidente*, obtenidos mediante programa de simulación de las condiciones ambientales de la edificación.

Dato de origen	Archivos resultantes	Descripción
Datos DAYSIM	«*.ill» «*_daylight_factor.DA»	Perfil anual de iluminancias horarias Factor de Iluminación Natural
Datos DesignBuilder	Libro de trabajo Microsoft Excel «nombremodelo.xlsx». Hoja: «SHG»	Perfil anual de valores horarios de las ganancias solares a través de las ventanas exteriores
Datos Ecotect	«*_sunlight.txt» «*_ave hourly radiation.txt»	Horas totales de soleamiento Radiación solar incidente media horaria

Tabla 53: Salida de datos de los programas de simulación

Cada conjunto de datos que proporciona cada programa difiere en unidad de medida, escala temporal y escala dimensional de los demás, por lo que para que puedan compararse, correlacionarse y analizarse es necesario establecer un marco común que establezca una base común de cálculo, así como diseñar un procedimiento para el tratamiento de los datos primarios de cálculo, teniendo en cuenta también el medio de expresión habitual de resultados.

This common framework for integrating and comparing calculation results provided primary data calculation bases and analysis criteria which in turn made it possible to create new, intercomparable daylight and insolation metrics, adopting the following specifications:

- The time range for the analysis of all primary data (*illuminance, solar gain, sunlight hours* and *incident solar radiation*) covered all the daytime hours in the year (4380 hours), thus discriminating the night-time hours in the year.
- Rather than a cumulative analysis at each sensor, which provides no information about the simultaneity of light conditions, an hourly analysis of annual hourly values profiles was performed so that hour-by-hour statistical values could be extracted for the whole workplane as a unitary element.

Although daylight metrics could be obtained taking the workplane as a unit, this was not possible for solar thermal gain, due to the directionality of incoming solar radiation and many other factors influencing the amount of solar gain through perimeter openings, so its contribution to spatial volume was limited to that of a dimensional unit of analysis.

To answer the questions “How much daylight is sufficient for a given space?” and “How much daylight begins to be uncomfortable?” the following analysis criteria drawn from the state-of-the-art were adopted:

- *Daylight Sufficiency*: according to this criterion, a space can be considered to be sufficiently daylight if 50% of the workplane has a level of daylight of 300 lux 50% of the time range covered in the study.
- *Useful Daylight Illuminance Range depending on visual task*: The range of useful illuminance that constitutes the conceptual basis for the *UDI* metric is too wide. If the aim is to establish a useful range for performing visual tasks, the levels of precision required in those tasks should be identified, since each one is associated with a specific illuminance range. The useful range (100-2000 lux) was therefore divided into three different ranges - 100 to 300 lux, 300 to 500 lux and 500 to 3000 lux - corresponding to visual tasks requiring a low, medium or high level of precision respectively.
- *Excessive Irradiance*: in view of the diversity of values and lack of consensus in the international community, and after having analysed scientific publications, it was established that when vertical irradiance through the window is  $150 \text{ W/m}^2$ , users will experience ambient conditions that, with a fair degree of certainty, will make them get up from their work posts to block the solar radiation entering the space, because of either glare (the most usual reason) or overheating.

Having established a common framework to integrate calculation bases and implemented the analysis criteria described above, five new metrics were defined:

- *Diffuse Daylight Sufficiency (DSd)*: the percentage of the workplane that simultaneously receives 300 lux of exclusively diffuse daylight 50% of the daytime hours, as quantified in data collected from climate records.
- *Global Daylight Sufficiency (DSg)*: the percentage of the workplane that simultaneously receives 300 lux of global daylight 50% of the daytime hours, as quantified in data collected from climate records.

El marco común de integración y comparación de resultados de cálculo establece unas bases de cálculo y unos criterios de análisis de los datos primarios que han permitido la creación de unos nuevos indicadores de iluminación natural e insolación comparables entre sí. Mediante este marco común se establecen las siguientes determinaciones:

- El rango temporal de análisis de todos los datos primarios (*iluminancia, ganancias solares, horas de soleamiento y radiación solar incidente*) abarca todas las horas diurnas anuales (4380 horas), discriminando, por tanto, las horas nocturnas anuales.
- Frente el análisis acumulativo en cada sensor, que no aporta información sobre la simultaneidad de las condiciones de iluminación, se realiza un análisis horario de los perfiles anuales de valores horarios de forma que se pueden extraer valores estadísticos por cada hora de todo el plano de trabajo considerado como un elemento unitario.

Mientras ha sido posible la obtención de indicadores de iluminación natural basados en el plano de trabajo como unidad, no se ha logrado con las ganancias solares térmicas debido a la direccionalidad de la radiación solar y otros muchos factores que intervienen en la determinación de las ganancias solares a través de los huecos exteriores, por lo que permanece su aportación al volumen espacial como unidad dimensional de análisis.

Para responder a las preguntas: cuánta luz natural es suficiente en un espacio y cuánta empieza a ser molesta, se establecen, en base al estado del arte, unos determinados criterios de análisis:

- *Suficiente Luz Natural*: se considera que un espacio está suficientemente iluminado naturalmente si el 50% del plano de trabajo alcanza un nivel de iluminación natural de 300 lux durante el 50% del tiempo de estudio considerado.
- *Rango de Iluminancia Natural Útil según la tarea visual*: El rango de iluminación útil que forma la base conceptual del indicador *UDI* resulta demasiado amplio. Si el objetivo es establecer un rango útil para el desarrollo de las tareas visuales, se debería distinguir el grado de precisión de la tarea visual, ya que lleva relacionado un determinado rango de iluminancias. Por ello se ha dividido el rango útil (100-2000 lux) en tres rangos diferentes conforme a tareas visuales de baja, media o alta precisión: de 100 a 300 lux, de 300 a 500 lux y de 500 a 3000 lux.
- *Irradiancia excesiva*: frente a la diversidad de valores y la falta de consenso en la comunidad internacional, se establece que cuando a través de la ventana se tiene una irradiancia vertical de  $150 \text{ W/m}^2$  el usuario se encuentra en unas condiciones ambientales tales que, con cierto grado de certeza, dejará su puesto de trabajo para bloquear la entrada de radiación solar en el espacio, ya sea por deslumbramiento, principalmente, o por sobrecalentamiento.

Como consecuencia del establecimiento del marco común de bases de cálculo y de la aplicación de los criterios de análisis se han definido cinco nuevos indicadores:

- *Suficiencia de Iluminación Natural Difusa (Diffuse Daylight Sufficiency -DSd)*: porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente 300 lux durante el 50% de las horas diurnas mediante exclusivamente la componente difusa de la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.
- *Suficiencia de Iluminación Natural Global (Global Daylight Sufficiency -DSg)*: porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente 300 lux durante el 50% de las horas diurnas debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.

- *Simultaneous Useful Daylight Illuminance (sUDI<sub>range</sub>)*: a set of 5 metrics showing the percentage of the workplane that simultaneously attains 5 different daylight-only illuminance ranges (<100 lux, 100–300 lux, 300–500 lux, 500–3000 lux and >3000 lux) during the daytime hours, as quantified in data collected from climate records.
- *Excessive Solar Heat Gain (SHGe)*: the percentage of daytime hours in which solar gain through perimeter openings is so high that it represents irradiance on the openings equal to or higher than 150 W/m<sup>2</sup>.
- *Maintained Global Daylight Sufficiency (DSm)*: the percentage of daytime hours in which 50% of the workplane sensors simultaneously receive 300 lux of global daylight, as quantified in data collected from climate records.

After applying the analysis criteria, the new lighting metrics can be expressed as a % of the workplane or a % of hours: that is to say, using unified units of measurement and thus becoming intercomparable.

The metrics created in this piece of research were defined by processing the output data from the software tools and focussing on those criteria which determine the light and heat comfort envelope of the solar radiation entering through perimeter openings, singling out only one variable from the parameters that make up each concept and fixing the values of all the others. This data processing procedure produced results expressed in different scales, making it possible to obtain research results for each model simulated and each parameter studied, and also global results. Each scale requires a given, representative level of accuracy that will allow the information provided to be processed appropriately.

Daylight and sunlight calculation results are mainly expressed in the form of surface graphs depicting values within a given space's boundaries, such as the distribution of values over the workplane, shadow projection and the stereographic projection of points in space. This indicates the directionality of the daylight. By presenting the distribution of values over the workplane together with the sunlight values, it is possible to identify those areas that are overexposed or require artificial lighting to attain levels of comfort. In contrast, energy calculation results are usually shown in graphs depicting how values (temperature, watts/hour) evolve over time.

To describe the daylighting and insolation levels in the calculation model, the simulation software output data is presented in two different formats: time charts for *illuminance* and *solar gain through perimeter openings* and distribution of *DF*, *sunlight hours* and *incident solar radiation* values over the workplane. The *sunlight hours* data had to be processed beforehand to equate it to the *Daylight Factor* time scale. This way it was possible to obtain not only quantitative but also qualitative information about the space's interior conditions.

For each type of primary output data obtained and target final result, a specific data processing procedure was designed using *MATLAB* and *Microsoft Excel* as support tools [Table 54]. The results and their corresponding graphs constituted the materials for the thesis, and would then be analysed both individually and by series and group of series to obtain the study's final conclusions.

- *Iluminancia Natural Útil Simultánea (Simultaneous Useful Daylight Illuminances -sUDI<sub>range</sub>)*: conjunto de 5 indicadores que muestran el porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente 5 rangos diferentes de iluminancia (<100 lux, 100-300 lux, 300-500 lux, 500-3000 lux y >3000 lux) durante las horas diurnas debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.
- *Insolación Excesiva (Excessive Solar Heat Gains -SHGe)*: porcentaje horas diurnas en que se supera una ganancia solar a través de los huecos exteriores tal que suponga una irradiancia sobre los mismos mayor o igual a 150 W/m<sup>2</sup>.
- *Suficiencia de Iluminación Natural Mantenido (Maintained Global Daylight Sufficiency -DSm)*: porcentaje de horas diurnas en que se alcanzan simultáneamente 300 lux en el 50% de los sensores del plano de trabajo debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.

Además, tras la aplicación de los criterios de análisis, los nuevos indicadores de iluminación se expresan como % plano de trabajo o % horas, es decir, bajo unas unidades de medida unificadas, pudiendo estar en disposición de ser comparables entre sí.

Los indicadores creados en este trabajo de investigación son resultado de realizar un tratamiento a la salida de datos de los programas que se basa en unos criterios que determinan los límites del confort lumínico y térmico de la *radiación solar* que entra por los huecos exteriores, de forma que de los parámetros que constituyen cada concepto sólo se deje una variable, fijando los valores de los demás parámetros. Con este tratamiento de datos se obtienen los resultados que se expresan a diferentes escalas, de forma que se obtienen resultados de investigación de cada modelo simulado, de cada parámetro estudiado y resultados globales de investigación. Cada escala requiere de un determinado nivel de precisión que resulte representativo y permita un adecuado manejo de la información aportada.

Los resultados de los cálculos de iluminación natural y soleamiento suelen expresarse fundamentalmente mediante gráficas superficiales, generalmente inscritas en los límites del espacio, como la distribución de valores sobre el plano de trabajo o la proyección de sombras o la proyección estereográfica de un punto del espacio. De esta forma se muestra la direccionalidad de la iluminación natural. La presentación de la distribución de valores en el plano de trabajo, junto con los estudios de asoleo, permite detectar las zonas sobreexpuestas o que requieren de iluminación artificial para alcanzar niveles de confort. Sin embargo, los resultados de los cálculos energéticos suelen mostrarse en gráficas que muestran la evolución de valores (temperatura, vatios hora) en el tiempo.

Con el objeto de describir las condiciones de iluminación natural e insolación del modelo de cálculo, se muestran los datos de salida de los programas de simulación en dos formatos distintos: mapas temporales de *iluminancia* y de *ganancia solar a través de los huecos exteriores* y distribución de valores sobre el plano de trabajo de *DF*, *horas de soleamiento* y *radiación solar incidente*. Los datos de *horas de soleamiento* requieren de un tratamiento de datos previo para equipararlos a la escala temporal del *Factor de Iluminación Natural*. De esta forma no sólo se tiene información cuantitativa sino también cualitativa de las condiciones interiores del espacio.

Según el tipo de dato primario obtenido y el resultado final a obtener se ha diseñado un procedimiento de tratamiento de datos específico, utilizado *MATLAB* y *Microsoft Excel* como herramientas de apoyo [Tabla 54]. Estos resultados, y sus gráficas, constituyen los materiales de la tesis, que se analizarán tanto individualmente como por serie y grupos de series para obtener las conclusiones de este trabajo.

Primary data	Result	Procedure	Format
Hourly illuminance at each point (lux) «*.ill» (DAYSIM)	sUDI 300-3000 (% workplane)	Analysis of hourly illuminance between 300 and 3000 lux on workplane in MATLAB	Time chart (descriptive)
	sUDI<100 sUDI 100-300 sUDI 300-500 sUDI 500-3000 sUDI> 3000 (% workplane)	Analysis of hourly illuminance in each range on workplane in MATLAB Monthly and annual median for % of work plane in each range in Microsoft Excel	Monthly and annual cumulative column graph (analytical)
	Global Daylight Illuminance Sufficiency (% workplane)	Analysis of hourly illuminance >300 lux on work plane in MATLAB Monthly and annual 50 percentile of hourly values in Microsoft Excel	Monthly and annual line graph (analytical)
	Maintained Daylight Sufficiency (% hours)	Analysis of hourly illuminance >300 lux on work plane in MATLAB Monthly and annual analysis of % of workplane >50 in Microsoft Excel	Monthly and annual line graph (analytical)
Daylight Factor (%) «*daylight_factor.DA» (DAYSIM)	Spatial Daylight Sufficiency	Analysis of hourly illuminance >300 lux on work plane in MATLAB Monthly and annual 50 percentile of hourly values in Microsoft Excel Monthly and annual analysis of % of workplane >50 in Microsoft Excel	Frequency distribution curve (analytical)
	Daylight Factor (%)	Conversion of values from list to chart in MATLAB: <b>resizing of matrix</b>	False colour map (descriptive)
Hourly solar gain (kW) «*.xls» (DesignBuilder)	Diffuse Daylight Sufficiency (% workplane)	Monthly and annual analysis of % of workplane with $DF_{monthly\ min.} > 50$ based on 300 lux/ 50% h in Microsoft Excel	Monthly and annual line graph (analytical)
	Hourly solar gain through windows (W)	Conversion of values from list to chart in MATLAB: <b>resizing of matrix</b>	Time chart (descriptive)
Total sunlight hours (h) «*.txt» (Ecotect)	Excessive solar heat gain (% hours)	Determination of maximum solar gain value for a maximum irradiance of 150 $W/m^2$ in Microsoft Excel Monthly and annual analysis of % of values above aforementioned maximum in Microsoft Excel	Monthly and annual line graph (analytical)
	Annual sunlight hours (%)	Annual impact with MATLAB	False colour map (descriptive)
Annual mean hourly incident solar radiation (Wh) «*.txt» (Ecotect)	Annual mean hourly incident solar radiation (Wh)	Graphic representation in MATLAB	False colour map (descriptive)

Table 54: Procedures followed and results obtained for each item of primary data

To be able to analyse the results, a series of graphs were created which correlate and show the interactions between different metrics. Monthly time evolution charts were also produced based on building energy performance graphs and showing the central monthly values of each new metric.



Dato primario	Resultado	Procedimiento	Formato
Iluminancia horaria en cada punto (lux) «*.ill» (DAYSIM)	sUDI 300-3000 (% plano de trabajo)	Análisis horario de iluminancias entre 300 y 3000 lux en el plano de trabajo en MATLAB	Mapa temporal (descriptivo)
	sUDI<100 sUDI 100-300 sUDI 300-500 sUDI 500-3000 sUDI>3000 (% plano de trabajo)	Análisis horario de iluminancias en cada rango en el plano de trabajo en MATLAB Mediana mensual y anual de % de plano de trabajo en cada rango en Microsoft Excel	Gráfica de columnas acumuladas mensual y anual (analítico)
	Suficiencia de Iluminancia Natural Global (% plano de trabajo)	Análisis horario de iluminancias >300 lux en el plano de trabajo en MATLAB Percentil 50 mensual y anual de valores horarios en Microsoft Excel	Gráfica de línea mensual y anual (analítico)
	Suficiencia de Iluminancia Natural Mantenido (% horas)	Análisis horario de iluminancias >300 lux en el plano de trabajo en MATLAB Análisis mensual y anual de % del plano de trabajo >50 en Microsoft Excel	Gráfica de línea mensual y anual (analítico)
	Suficiencia Espacial de Iluminancia Natural	Análisis horario de iluminancias >300 lux en el plano de trabajo en MATLAB Percentil 50 mensual y anual de valores horarios en Microsoft Excel Análisis mensual y anual de % del plano de trabajo >50 en Microsoft Excel	Curva de distribución de frecuencias (analítico)
Factor de Iluminación Natural (%) «*daylight_factor.DA» (DAYSIM)	Factor de Iluminación Natural (%)	Conversión de lista a mapa de valores en MATLAB: <b>redimensionado de la matriz</b>	Mapa de falso color (descriptivo)
	Suficiencia de Iluminancia Natural Difusa (% plano de trabajo)	Análisis mensual y anual de % del plano de trabajo $DF_{\min, \text{mensual}} > 50$ en base al criterio 300 lux, 50% h en Microsoft Excel	Gráfica de línea mensual y anual (analítico)
Ganancias solares horarias (kW) «*.xls» (DesignBuilder)	Ganancias solares horarias a través de las ventanas (W)	Conversión de lista a mapa de valores en MATLAB: <b>redimensionado de la matriz</b>	Mapa temporal (descriptivo)
	Insolación excesiva (% horas)	Determinación del valor límite de ganancia solar para una irradiancia límite de $150 \text{ W/m}^2$ en Microsoft Excel Análisis mensual y anual de % de valores que superan dicho valor en Microsoft Excel	Gráfica de línea mensual y anual (analítico)
Horas de soleamiento totales (h) «*.txt» (Ecotect)	Horas de soleamiento anual (%)	Repercusión anual con MATLAB	Mapa de falso color (descriptivo)
Radiación solar incidente horaria media anual (Wh) «*.txt» (Ecotect)	Radiación solar incidente horaria media anual (Wh)	Representación gráfica en MATLAB	Mapa de falso color (descriptivo)

Tabla 54: Procedimientos aplicados y resultados obtenidos por cada dato primario

Por otro lado, y con objeto de poder realizar un análisis de estas condiciones, se crean una serie de gráficas que correlacionan varios indicadores para poder observar su interacción, así como, en base a las gráficas de análisis del comportamiento energético de los edificios, gráficas de evolución temporal, en base mensual, donde se plasman los valores centrales mensuales de cada uno de los nuevos indicadores.

The metrics are shown as time evolution (X axis) charts. Since two units of measurement are involved (%wp, %h), these are expressed on a double Y axis. For purposes of differentiation and comparison, metrics based on the *UDI* concept are shown as a bar graph whereas those based on *Daylight Sufficiency* and *Excessive Solar Gain* are shown as a curve graph.

To organize and represent the data generated by each calculation model methodically and serially in the format which best expresses its potential, the research results were then synthesised by creating a «synthesis-analysis sheet» for each model. The aim of these sheets was not only to present the research results obtained in an ordered manner, but also to include an individual analysis of the model's daylighting and insolation data together with information describing the model itself.

At series level, it was necessary to carry out another exercise in synthesis, so that the evolution and impact of the changes made to the study parameter in question could be understood. One single, representative value for each metric was needed in order to be able to chart that metric's evolution. In this case, the annual value of each metric facilitated comparison between the different results obtained with each calculation model,

So, to analyse the results obtained from all the models and thus see the changes in each study parameter, a statistical analysis was presented based on analysis criteria for annual values.

The median annual values were used to analyse the results not only for each calculation series, but also for each metric, through the computation of the corresponding statistical values – including standard deviation, a value which allowed global analysis of all the research results.

Finally, a real case was taken as an example from which to establish the procedure to be followed when applying these results practically in architectural design. This procedure methodologically defined both the principal objective and the starting hypothesis of the research project.

Los indicadores se muestran como gráficas de evolución en el tiempo (eje X). Al tener dos unidades de medida (%wp, %h), se expresan a doble eje Y. Los indicadores basados en el concepto de *UDI* se muestran como gráfica de barras mientras que los indicadores basados en el concepto de *Suficiente Luz Natural* y *Excesiva Ganancia Solar* se muestran como gráfica de curvas para poder distinguirlos y compararlos.

Para organizar y presentar la información generada para cada modelo de cálculo de forma metódica y seriada, en el formato que mejor exprese su potencial, se ha procedido a realizar una siguiente fase de síntesis de resultados de investigación mediante la elaboración de una «ficha síntesis-análisis» por cada modelo de cálculo, con la intención de que no sea sólo la exposición ordenada de los resultados de investigación obtenidos, sino que también incluya el análisis individual de las condiciones de iluminación natural e insolación del modelo, así como información descriptiva de las características del mismo.

A nivel de serie es necesario volver a realizar otro ejercicio de síntesis, de forma que pueda entenderse la evolución y el impacto de la modificación del parámetro de estudio. La exposición de la evolución de cada uno de los indicadores requiere de un valor único representativo por cada uno de ellos. En este caso, el valor anual de cada indicador facilita la comparación de los diferentes resultados obtenidos con cada modelo de cálculo.

De esta forma, para realizar el análisis de resultados obtenidos para todos los modelos que muestran la variación de cada uno de los parámetros de estudio se muestra el análisis estadístico en base a los criterios de análisis en base anual.

Con estos valores medianos anuales no sólo se realiza el análisis de resultados por serie de cálculo, sino que también se realiza el análisis de resultados por cada indicador mediante el cálculo de sus valores estadísticos, incluida la desviación estándar, valor que permite el análisis global de todos los resultados de investigación.

Por último se establece el procedimiento a seguir para la aplicación de estos resultados al diseño arquitectónico mediante el uso de un caso real como ejemplo. Este procedimiento expresa de forma metodológica el objetivo principal de esta investigación, así como la hipótesis de partida de este trabajo.



# RESULTADOS 4

## 4. Analysis of Results

This chapter analyses the research results obtained using the calculation methodology explained in the previous chapter. The analysis presented here focuses on each series or group of series. Individual analyses of the different calculation models can be found in Annex B in each «synthesis-analysis sheet».

Since this research project was based on comparing results with those obtained from a reference model, however, an in-depth individual analysis of both descriptive and analytical results from that reference model is included in this first section of the chapter.

The annual results of the models that made up each calculation series and the series that made up each block are analysed below, based on a classification of the different calculation parameters. The blocks, to which a separate section is dedicated, were: Climate Conditions, Site Potential and Architectural Design. Apart from the Climate Conditions section, which corresponds to the “Site” study parameter, all the other sections are made up of several series or study parameters.

Analysis of each series is followed by a global analysis of the results obtained, in which the impact of each study parameter on the new daylight and insolation metrics defined in the previous chapter is evaluated.

Finally, a theoretical new construction project is described to illustrate how the results obtained can be applied in architectural design. This section makes it possible to establish guidelines for the incorporation of each study parameter into the design phases of a new building, prioritizing its importance. Consideration of these parameters can be seen as a kind of pre-estimation procedure with regard to daylighting and insolation in the spaces in question, establishing specifications that should be adjusted and checked at the end of the design process, once the building is fully defined.

### Analysis of Results

- Reference Model
- Climate Conditions: Site series
- Site potential: Frontal Obstruction and Orientation series
- Architectural Design
  - Openings: Opening Size, Transparency, Position, Shape, Segmentation and Distribution series.
  - Shading: Overhang, Vertical Fin and Fixed Louver series
- Global Analysis of Results
- Application in Architectural Design

## 4. Análisis de Resultados

En el presente capítulo se aborda el análisis de los resultados de investigación obtenidos tras aplicar la metodología de cálculo explicada en el capítulo anterior. El análisis que se muestra en este capítulo se centra en el análisis de cada una de las series o grupos de series. El análisis individual de los modelos de cálculo se encuentra en el Anexo B en cada «ficha síntesis-análisis».

Sin embargo, debido a que esta investigación se basa en un análisis comparativo de los resultados respecto a los obtenidos respecto a un modelo de referencia, el análisis individual y extendido de los resultados descriptivos y analíticos de este modelo se presentan en este capítulo y constituyen el primer apartado.

A continuación, y en base a la clasificación de los parámetros de cálculo, se procede a analizar los resultados anuales de los modelos que componen cada serie de cálculo y los resultados de las series que componen cada bloque. Estos bloques corresponden con un apartado del presente capítulo y son: Condiciones climáticas, Potencialidad del Emplazamiento, y El proyecto arquitectónico. Salvo en el apartado relativo a las condiciones climáticas, que corresponde con el parámetro de estudio 'Localización', los demás apartados se componen de varias series o parámetros de estudio.

Tras el análisis de cada serie, se realiza el análisis global de los resultados, valorando el impacto de cada uno de los parámetros de estudio sobre los nuevos indicadores de iluminación natural e insolación definidos en el capítulo anterior.

Por último, se expone la aplicación de los resultados obtenidos al diseño arquitectónico, mediante un caso teórico de nueva construcción. Este apartado permite trazar una guía de aplicación de cada uno de los parámetros de estudio a las fases de diseño de un nuevo edificio, priorizando su importancia. Esta aplicación servirá a modo de predimensionado de las condiciones de iluminación natural e insolación de los espacios contemplados, que deberán afinarse y comprobarse al final del proceso de diseño, cuando el edificio está completamente definido.

### Análisis de resultados

- Modelo de referencia
- Condiciones climáticas: Serie Localización
- Potencialidad del emplazamiento: Series Obstrucción Frontal y Orientación
- El proyecto arquitectónico
  - El hueco: Series Tamaño, Transparencia, Posición, Forma, División y Distribución del hueco
  - Las protecciones solares: Series Voladizo, Salientes laterales y Lamas fijas
- Análisis global de resultados
- Aplicación al diseño arquitectónico





## 4.1 Modelo de referencia

Para la realización del experimento se ha definido un modelo de referencia en el que se han fijado las constantes reflejado mediante un valor determinado de cada uno de los parámetros de estudio. Sobre el modelo de referencia se ha modificado una variable en cada serie, controlando y registrando su efecto en los parámetros que puedan verse afectados por dicha variación.

En la definición del modelo de referencia no sólo han intervenido los requisitos sobre iluminación natural establecidos por los documentos legislativos, las reglas de oro u otras instituciones internacionales, sino que también se han incluido los requisitos relativos a la envolvente térmica establecidos en la normativa.

Por cada modelo de cálculo se han obtenido valores de *iluminancia natural* y de *Factor de Iluminación Natural*, obtenidos mediante la *Modelación climática de la Luz Natural (CBDM)* utilizando un programa específico basado en el motor de cálculo de *Radiance*, de *ganancia solar térmica a través de los huecos exteriores*, mediante un método basado en el *método del Balance Térmico* utilizando un programa específico basado en el motor de cálculo *EnergyPlus*, y valores complementarios como las *horas de soleamiento* y la *radiación solar incidente*, obtenidos mediante programa de simulación de las condiciones ambientales de la edificación.

Estos datos necesitan un cierto tratamiento tanto para el posterior análisis como para su representación gráfica de forma unificada. El tratamiento realizado por cada archivo de origen para la obtención de los resultados descriptivos de las condiciones de iluminación natural e insolación se muestran en la Tabla 55.

Dato de origen	Archivos resultantes	Descripción
«*.ill»	«DDMh.DA»	Análisis horario de iluminancias en el plano de trabajo: %wp>300 lux (DA300,wp) %wp<100 lux (sUDI100,wp) 100>%wp>300 (sUDI100-300,wp) 300>%wp>500 (sUDI300-500,wp) 500>%wp>3000 (sUDI500-3000,wp) %wp>3000 lux (sUDI3000,wp)
	«sUDI 300-3000 temp.xlsx» «Fig1_UDltemp.jpg»	Análisis horario de iluminancias en el plano de trabajo 300 lux >%wp>3000 lux (sUDI300-3000,wp)
Hoja: «SHG»	«SHG temp.xlsx» «Fig2_SHGtemp.jpg»	Conversión de lista a mapa de valores
«*.daylight_factor.DA»	«DF wp.xlsx» «Fig3_DFwp.jpg»	Conversión de lista a mapa de valores
«*_sunlight.txt»	«relative sunlighthours.DA» «SOL wp.xlsx» «Fig4_SOLwp.jpg»	Repercusión horaria
«*_ave hourly radiation.txt»	«ave inc solar radiation.DA» «RAD wp.xlsx» «Fig5_RADwp.jpg»	Formato gráfico

Tabla 55: Procesos seguidos durante la ejecución de rutinas en *MATLAB*

Mientras los resultados descriptivos pueden mostrar de forma horaria cómo son las condiciones de iluminación natural e insolación de cada modelo de cálculo, para poder realizar un análisis de los resultados es necesario trabajar con los valores de los indicadores.

La aplicación de los *criterios de Suficiente Luz Natural, Iluminancia Útil para las tareas visuales y de Insolación Excesiva* da lugar a la definición de la *Suficiencia Global y Difusa de Iluminación Natural (Global Daylight Sufficiency y Diffuse Daylight Sufficiency -DSg y DSd)* expresados como

porcentaje del plano de trabajo y de la *Suficiencia de Iluminación Natural Mantenido y la Insolación Excesiva (Maintained Daylight Sufficiency y Excessive Solar Heat Gains -DSm y SHGe)* expresados como porcentaje de horas diurnas.

Así mismo también se obtienen series temporales del porcentaje del plano de trabajo que se encuentra simultáneamente dentro de unos determinados rangos de iluminancia útiles para el desarrollo de tareas visuales de diferente precisión. Este conjunto se llama *Iluminancia Natural Útil Simultánea (Simultaneous Useful Daylight Illuminance -sUDI)* y se expresa en porcentaje del plano de trabajo.

Sobre los datos de origen se han aplicado una serie de procedimientos de tratamiento de datos para la obtención de los resultados analíticos de las condiciones de iluminación natural e insolación, que permiten determinar si un espacio se puede considerar iluminado naturalmente y su relación con la insolación del mismo [Tabla 56].

Expresión	Resultado	Dato de origen	Programa	Procedimiento
	Suficiencia de Iluminancia Natural Difusa (% wp) DSd	Factor de Iluminación Natural «*.daylight_factor.DA»	DAYSIM	Determinación de $DF_{cb\ min}$ mediante la obtención de $E_{d,h,med}$ del archivo climático en Microsoft Excel. Análisis mensual y anual de %wp que supera dicho valor mínimo en Microsoft Excel
Gráfica de línea mensual y anual	Suficiencia de Iluminancia Natural Global y Mantenido (% wp y % h) DSg y DSm	Iluminancia horaria en cada punto «DDMh.DA»	DAYSIM	Análisis horario de iluminancias en el plano de trabajo que superan un valor mínimo en MATLAB Análisis mensual y anual de %wp y %h que se supera un determinado valor mínimo en Microsoft Excel
	Insolación Excesiva (% h) SHGe	Ganancias solares a través de las ventanas (kW) Hoja: «SHG»	DesignBuilder	Determinación del valor límite en función de la superficie de hueco (W) en Microsoft Excel. Análisis mensual y anual de % de valores que superan dicho valor límite en Microsoft Excel
Gráfica de barras acumuladas mensual y anual	sUDI <100 sUDI 100-300 sUDI 300-500 sUDI 500-3000 sUDI >3000 (% wp)	Iluminancia horaria en cada punto «DDMh.DA»	DAYSIM	Análisis horario de iluminancias en cada rango en el plano de trabajo en MATLAB Mediana mensual de %wp en cada rango en Microsoft Excel

Tabla 56: Resultados analíticos: Indicadores, formato de expresión, datos de origen, programas de obtención y procedimiento seguido.

A continuación se realiza el análisis tanto de los resultados descriptivos como analíticos del modelo de referencia para poder realizar el análisis comparativo con los demás modelos de cálculo del experimento, organizados en series o parámetros de estudio.

Considerando como rango de iluminancia útil para el desarrollo de la mayoría de las tareas visuales el comprendido entre 300 y 3000 lux, se puede observar en la Figura 259 que el modelo recibe luz natural a lo largo del año entre las 8 y las 20 h.

Sin embargo, el periodo diario en el que se asegura una iluminación natural entre 300 y 3000 lux del plano de trabajo con una cobertura del 80-90% es el que se comprende entre las 10 y las 18

h (GMT+1+1:00) desde principios de Marzo a fin de Septiembre. Esta cobertura llega a ser de hasta el 100% del plano de trabajo en dicho horario de principios de Mayo a mitad de Agosto. Este horario, trasladado a horario de ocupación del espacio, aprovecharía al máximo el potencial de iluminación natural del espacio. Fuera de este horario es necesario el consumo de energía para iluminación artificial del plano de trabajo.

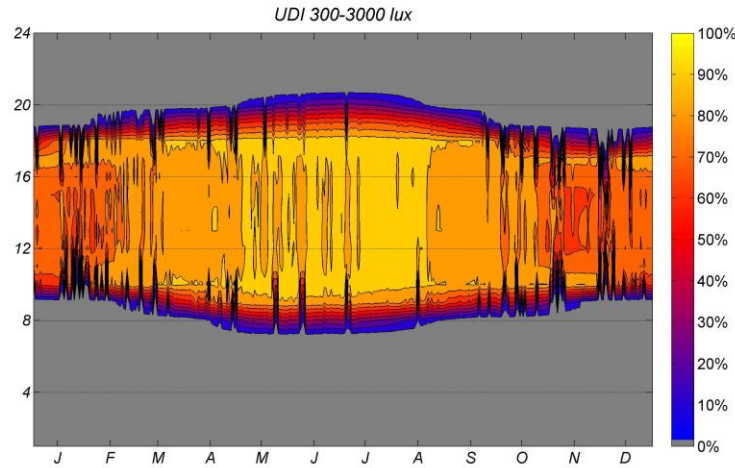


Figura 259: Mapa temporal de *sUDI 300-3000 lux*. [Fig 1 Tabla 55]. P.M. Esquivias.

De principios de Octubre a final de Febrero predomina una cobertura del 70-80% pero en un horario comprendido entre las 11h y las 17h. En este periodo puntualmente se obtiene una cobertura entre el 60-70% en las horas centrales del día en los meses de Noviembre y Febrero. Si se compara la disminución en la cobertura del plano de trabajo en rango útil con la *disponibilidad de luz natural*, expresada como *iluminancia global horizontal ( $E_{g,h}$ )* [Figura 260], se comprueba la relación entre la variabilidad de las condiciones exteriores y su repercusión en las condiciones interiores.

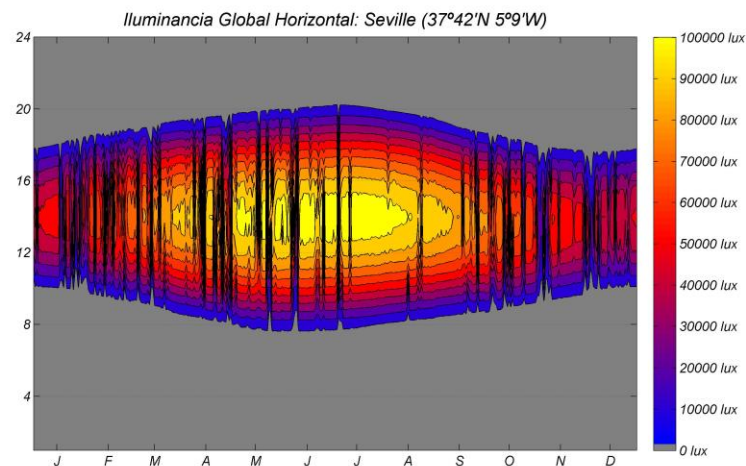


Figura 260: *Iluminancia Exterior Global Horizontal* del archivo climático de Sevilla. P.M. Esquivias

Si nos centramos en la idoneidad del espacio para el desarrollo de las tareas visuales en función de su nivel de precisión [Figura 261], se observa que los mayores porcentajes de cobertura del plano de trabajo se presentan en las horas centrales del día a lo largo del año en un rango de iluminancias entre 500 y 3000 lux, luego el espacio de referencia resulta adecuado para el desarrollo de tareas visuales de alta precisión.

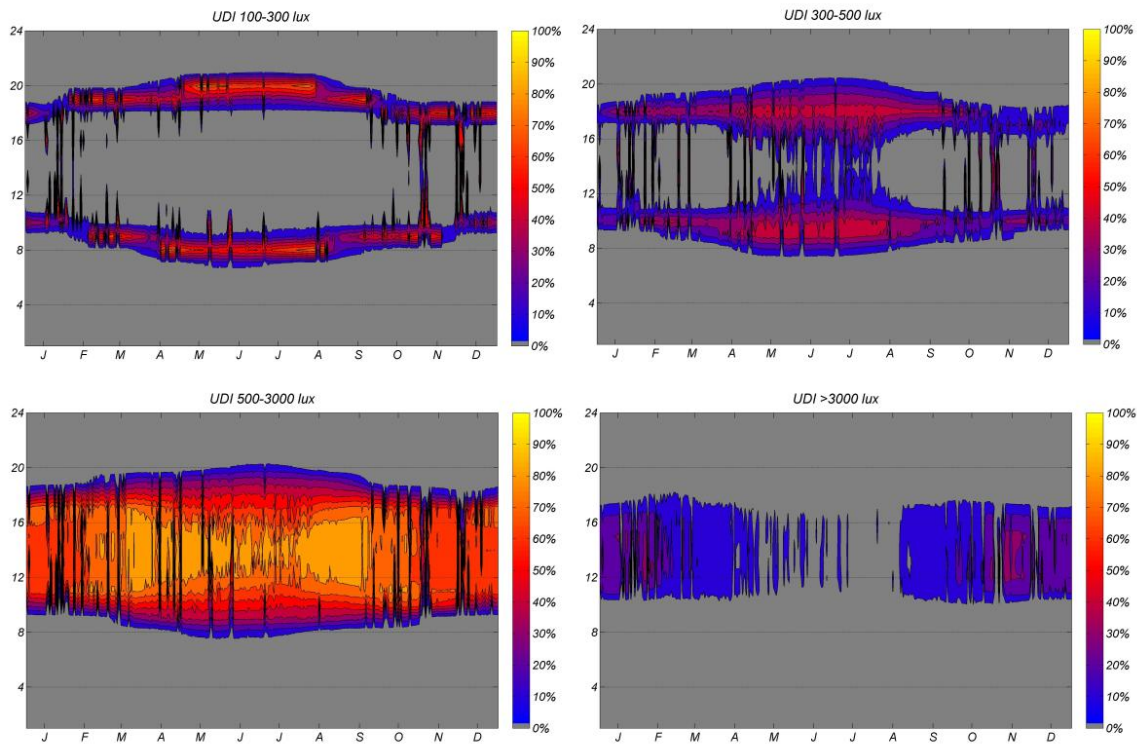


Figura 261: Mapa temporal de *Iluminancia Natural Útil Simultánea* para los rangos 100-300 lux, 300-500 lux, 500-3000 lux y >3000 lux. P.M. Esquivias

También se observa que tanto para el desarrollo de tareas visuales de baja o media precisión, las condiciones de iluminación natural del espacio son excesivas, luego, aunque se podrían desarrollar dichas tareas visuales, es probable que el exceso de iluminación pudiera provocar un ambiente luminoso demasiado brillante dando lugar a situaciones de discomfort visual.

La aparición de situaciones de deslumbramiento, por iluminancias mayores de 3000 lux, tiene mayor probabilidad durante el periodo invernal, con una cobertura del plano de trabajo de hasta un 30%, seguido de las medias estaciones donde la cobertura asciende al 10% del plano de trabajo con una iluminancia mayor de 3000 lux.

Esta variación a lo largo del año puede deberse a la mayor penetración solar en el espacio durante dichos periodos respecto a la época estival, acentuada por la componente reflejada interior del espacio, hecho deducible por la diferencia en el periodo invernal del horario de disponibilidad de luz natural exterior y el potencial de iluminación natural interior.

El periodo diario en el que se perciben ganancias solares a través de la ventana es desde las 10 a las 18h [Figura 262], coincidiendo con el horario de máximo potencial de iluminación natural. Dicho rango diario desciende en los meses centrales del año debido a la geometría relativa de la trayectoria solar respecto a la orientación de la ventana.

La mayor entrada de calor se produce en las horas centrales del día, con los valores máximos en los meses de Diciembre y Enero. La coincidencia de horarios, especialmente en los meses de invierno, denota que las condiciones de iluminación natural del espacio son consecuencia de la presencia de soleamiento directo. La diferencia en los meses de verano apunta a unas condiciones de iluminación natural basadas fundamentalmente en la componente difusa, propiciadas por la disponibilidad exterior.

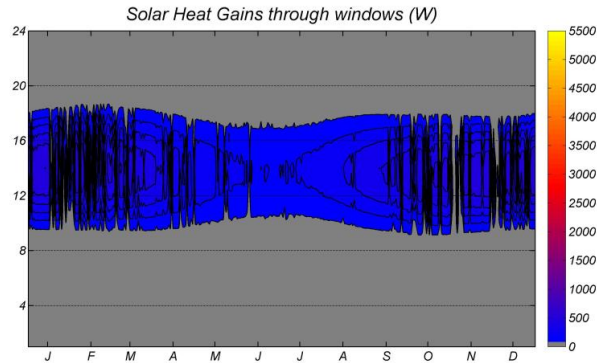


Figura 262: Mapa temporal de las ganancias solares a través del hueco. [Fig 2 Tabla 55]. P.M. Esquivias.

La presencia del Sol en el plano de trabajo es más patente en el primer tercio adyacente al plano de fachada, principalmente en el área próxima a la ventana [Figura 263]. Dicha presencia se ve acompañada con la mayor cantidad de *radiación solar incidente*.

Sin embargo la diferencia entre ambas distribuciones se puede deber a la componente difusa de la luz, ya que la distribución de *radiación solar incidente* parece una mezcla entre la distribución de valores *DF* (sólo componente difusa) y de *horas de soleamiento* (sólo componente directa). La forma de distribución de valores globales muestra una mayor similitud a la componente difusa, con alta influencia de la componente directa, especialmente bajo la ventana.

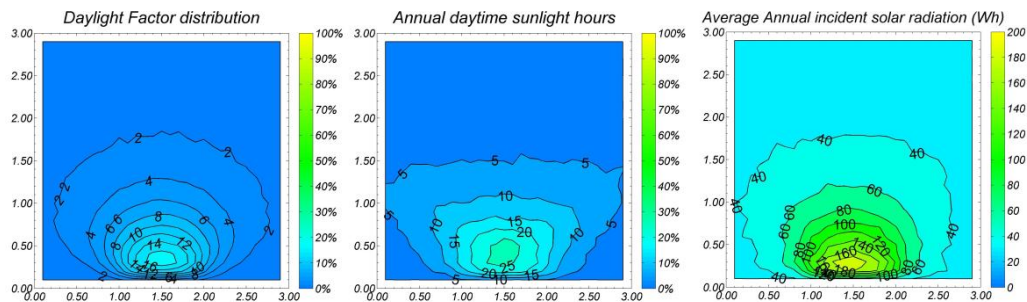


Figura 263: Mapas de falso color de las condiciones de iluminación e insolación difusa, directa y global

Establecido internacionalmente el requisito de 2% *DF*, como mínimo, la isolínea que representa dicho valor tiene una penetración de aproximada de 1'70 m desde la ventana y corresponde con una radiación solar incidente horaria media anual de ~40 Wh. La curva de 5% de horas diurnas de soleamiento (219 h) presenta un corte claro a 1'50 m de la ventana.

El promedio de valores *DF* parece cumplir con el mínimo (2'92%>2%), pero el 50 % del plano de trabajo se encuentra por debajo de dicho valor (1'71%<2%) [Tabla 57]. Además, la distribución de valores *DF* muestra una muy baja uniformidad, aunque la radiación solar incidente media anual muestra una uniformidad aceptable.

	Daylight Factor	Incident Sunlight	Incident Solar Radiation
	%	%h	Wh
Max	17.31%	27.35%	195.86
Med	1.71%	3.70%	38.07
Ave	2.92%	5.24%	48.61
Min	0.32%	0.00%	29.54
Min/Ave	0.11	0.00	0.61
Ave/Max	0.17	0.19	0.25
Min/Max	0.02	0.00	0.15

Tabla 57: Análisis estadístico de la distribución de valores sobre el plano de trabajo.

En este sentido, se constatan las afirmaciones de *Mardaljevic y Christoffersen* sobre la recomendación de utilización de valores medianos, así como la evidencia de que los valores medios son mayores a los valores medianos en los espacios iluminados unilateralmente [1] [47] [50] [220] [224].

Por otro lado, definida la *insolación excesiva (SHGe)* y obtenido el porcentaje del plano de trabajo que, con la misma frecuencia temporal que *SHGe*, supera simultáneamente 3000 lux, se observa que para el caso del modelo de referencia, para un valor de *SHGe* de 40% se anula el porcentaje del plano de trabajo que supera simultáneamente 3000 lux (*sUDI<sub>>3000</sub>*) [Figura 264].

Este valor de 40%h de *Insolación Excesiva* puede establecerse como un indicativo de cierta probabilidad de que los usuarios bajen las persianas debido a discomfort visual y térmico por deslumbramiento y sobrecalentamiento. Sin embargo es necesario profundizar en la investigación en este campo para establecer los valores máximos de intensidad solar y porcentaje temporal en que se producen dichas condiciones de discomfort.

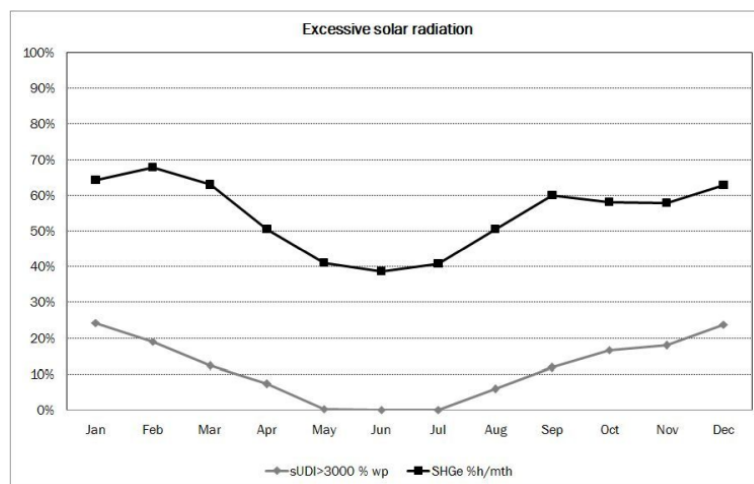


Figura 264: Curva de Excesiva Radiación Solar. P.M. Esquivias

Establecido el *criterio de Suficiente Luz Natural* en 300 lux, el 50% del tiempo con una cobertura del 50% del plano de trabajo, se puede decir que el espacio tiene suficiente iluminación natural global durante todo el año [Figura 265].

Con la componente global durante el 50% del tiempo se cubre aproximadamente el 97% del plano de trabajo. Por otro lado, el porcentaje del horas diurnas en que se tiene 300 lux en al menos el 50% del plano de trabajo se sitúa alrededor del 75%, luego en el 25% del tiempo es necesario apoyo eléctrico para cubrir el 50% del plano de trabajo.

Pero si nos centramos sólo en la componente difusa, concepto derivado del *Factor de Iluminación Natural*, sólo tendríamos iluminación natural suficiente de Marzo a Octubre, necesitando según este indicador iluminación artificial durante el resto del año durante las horas diurnas [Figura 266].

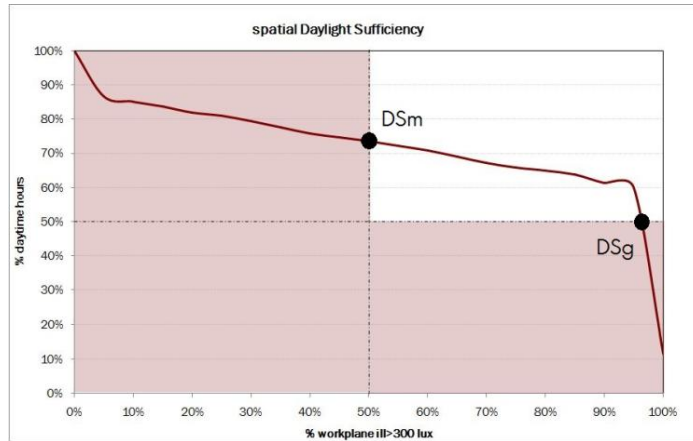


Figura 265: Curva de Suficiencia Espacial de Iluminación Natural. P.M. Esquivias

La relación entre las condiciones de iluminación natural global y difusa y las ganancias solares a través de las ventanas también se ve reflejada en la evolución de las curvas de Suficiencia de Iluminación Natural Global y Difusa ( $DSg$  y  $DSd$ ) del plano de trabajo [Figura 266].

En los meses de otoño e invierno, salvo incidencias climáticas, las condiciones de iluminación natural se deben principalmente a la componente directa (altos valores de  $DSg$  con bajos valores de  $DSd$ ), mientras que en los meses de primavera y verano aumenta la componente difusa a la par que disminuye la insolación excesiva, y con ella, la incidencia directa.

Las curvas  $DSg$  y  $DSm$  presentan relativamente pocas variaciones, respecto al comportamiento que presentan las curvas  $DSd$  y  $SHGe$ , que parecen evolucionar, además, de forma inversa. También se observa un cierto paralelismo entre la evolución de la curva  $SHGe$  y de  $sUDI_{>3000}$ , lo cual puede representar una relación entre la insolación del espacio y la aparición de zonas del plano de trabajo sobreiluminadas.

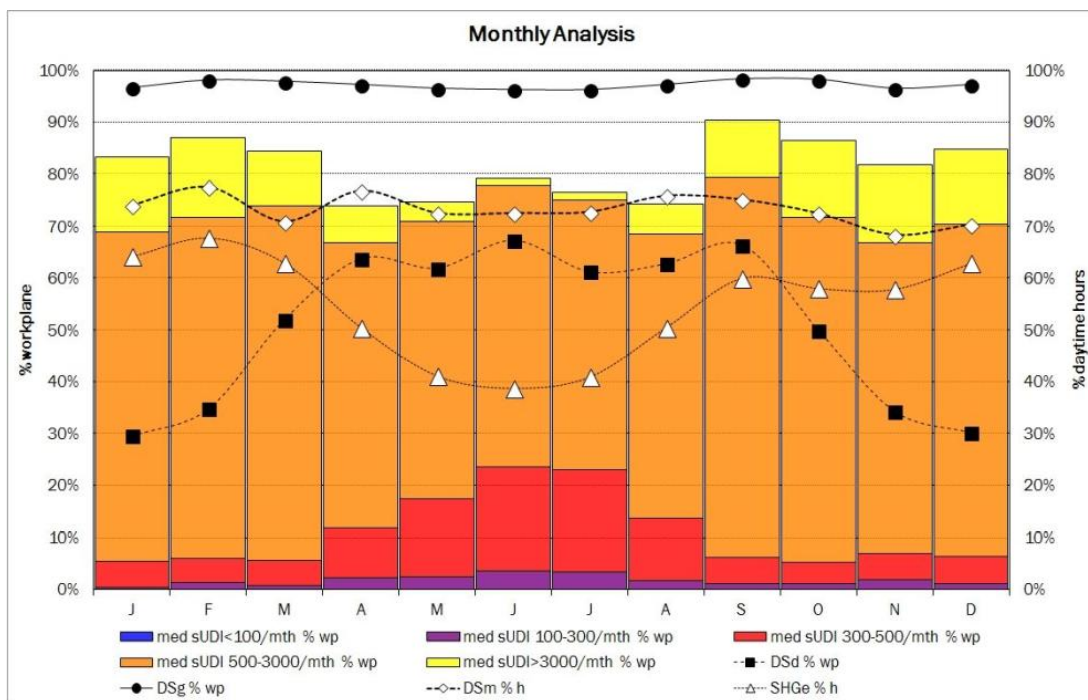


Figura 266: Gráfica de análisis mensual de los indicadores  $DSg$ ,  $DSd$ ,  $DSm$ ,  $SHGe$  y  $sUDI$ . P.M. Esquivias.

	<i>sUDI</i> /med/mth					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	<i>SHGe</i>
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
January	0.00%	0.48%	4.99%	63.50%	14.39%	29.61%	96.79%	74.19%	64.22%
February	0.00%	1.43%	4.64%	65.76%	15.28%	34.84%	98.22%	77.71%	67.83%
March	0.00%	0.71%	4.99%	68.37%	10.34%	52.20%	97.98%	71.03%	62.97%
April	0.00%	2.26%	9.57%	54.99%	7.13%	63.85%	97.38%	76.98%	50.50%
May	0.00%	2.50%	14.98%	53.51%	3.69%	62.07%	96.67%	72.69%	41.08%
June	0.00%	3.57%	19.92%	54.52%	1.19%	67.42%	96.43%	72.67%	38.67%
July	0.00%	3.33%	19.62%	52.20%	1.55%	61.36%	96.43%	72.90%	40.86%
August	0.00%	1.66%	11.95%	54.99%	5.83%	62.90%	97.38%	76.01%	50.45%
September	0.00%	1.19%	5.11%	73.13%	11.00%	66.47%	98.45%	75.26%	60.05%
October	0.00%	1.13%	4.22%	66.35%	14.74%	50.06%	98.34%	72.58%	58.06%
November	0.00%	1.90%	4.99%	60.05%	14.86%	34.36%	96.67%	68.42%	57.89%
December	0.00%	1.19%	5.23%	63.97%	14.51%	30.20%	97.38%	70.44%	62.89%
Annual	0.00%	2.14%	9.51%	58.50%	6.06%	54.93%	97.38%	73.48%	53.43%

Tabla 58: Valores mensuales de los indicadores de iluminación natural e insolación *DSg*, *DSd*, *DSm*, *SHGe* y *sUDI*.

Se observa que las condiciones, en este caso particular, en que se maximiza la presencia de iluminancias útiles para el desarrollo de tareas visuales de media y alta precisión en equilibrio con la presencia de zonas sobreiluminadas en el espacio tienen lugar en el periodo comprendido entre Abril y Agosto cuando la *insolación excesiva* presenta unos valores menores o iguales al 50% del periodo considerado.

También parece existir una cierta relación entre la disminución de los valores de *sUDI*<sub>>3000</sub> y el aumento de los valores de *sUDI*<sub>300-500</sub>. En este caso particular ambos indicadores parecen ser complementarios, alcanzando la suma de ambos valores centrales mensuales una cobertura de aproximadamente el 20% del plano de trabajo [Tabla 58].

El rango predominante de iluminación natural del espacio es el comprendido entre 500 y 3000 lux, tal como se pudo comprobar en el mapa temporal correspondiente [Figura 261], cuya cobertura mínima es mayor del 50% del plano de trabajo y la máxima es cercana al 75%. Durante las horas diurnas los valores centrales no muestran presencia de zonas del plano de trabajo con un nivel de iluminación natural inferior a 100 lux, por lo que no es necesaria la presencia de iluminación artificial de forma continua en el espacio. Además, la escasa presencia de zonas con niveles de iluminación natural entre 100 y 300 lux indica la posibilidad de no utilizar la iluminación artificial durante el periodo diurno para desarrollar tareas visuales de precisión media.

Sin embargo, la presencia de zonas sobreiluminadas, especialmente en invierno, acompañada de altos valores de *insolación excesiva*, provocará que el usuario active los dispositivos de protección solar que tenga disponibles, repercutiendo en un descenso de iluminación natural en el espacio probablemente de tal magnitud que se requiera del uso de la iluminación artificial para el desarrollo de las tareas visuales.



## 4.2 Condiciones climáticas

Tras la organización de las localidades de las que se dispone de archivo climático según la *clasificación climática de Köppen*, la diferencia entre la *disponibilidad de luz natural* difusa o global, su latitud y el valor de  $E_{h,d,med}$ , se seleccionan 13 capitales de los países de la región IV más las 5 capitales de provincias españolas, ordenadas según su latitud [Tabla 59, Figura 267]:

Nº	País	Ciudad	WMO Estación	Köppen	$\Delta E_g - E_d$ (%)	Latitud (°)	$E_{h,d,med}$ (lux)
1	ICL	REYKJAVIK	40300	Cfc	17,99%	64,13	11400
2	NOR	OSLO	14880	Dfb	15,17%	59,90	12300
3	RUS	MOSCOW	276120	Dfb	17,42%	55,75	14700
4	POL	WARSAW	123750	Cfb	19,78%	52,17	14600
5	UKR	KIEV	333450	Dfb	26,27%	50,40	17400
6	FRA	PARIS	71490	Cfb	22,17%	48,73	15800
7	B&H	BANJA LUKA	132420	Cfb	29,17%	44,78	17000
8	ROM	BUCHAREST	154200	Dfa	36,27%	44,50	18100
9	SPA	SANTANDER	080230	Cfb	28,40%	43,47	17400
10	ITA	ROME	162420	Csa	37,99%	41,80	19100
11	SPA	BARCELONA	081810	Csa	39,74%	41,28	18500
12	SPA	MADRID	082210	Csa	52,14%	40,45	16800
13	SPA	PALMA	083060	Csa	49,33%	39,55	18900
14	SPA	VALENCIA	082840	Csa	51,40%	39,50	17400
15	PRT	LISBON	85360	Csa	52,97%	38,73	18200
16	SPA	SEVILLE	83910	Csa	51,90%	37,42	19000
17	SYR	DAMASCUS	400800	Bsh	63,73%	33,42	17300
18	ISR	JERUSALEM	401840	Csa	61,67%	31,78	17400

Tabla 59: Localizaciones de la Región 6 seleccionadas tras aplicar los criterios indicados en el texto.

En el [Anexo A: Factor de Iluminación Natural en base climática] se muestra el estudio realizado sobre los archivos climáticos para la selección de los mismos como variables de cálculo, así como para la obtención del criterio de análisis de resultados en función a la *disponibilidad de luz natural difusa exterior*.

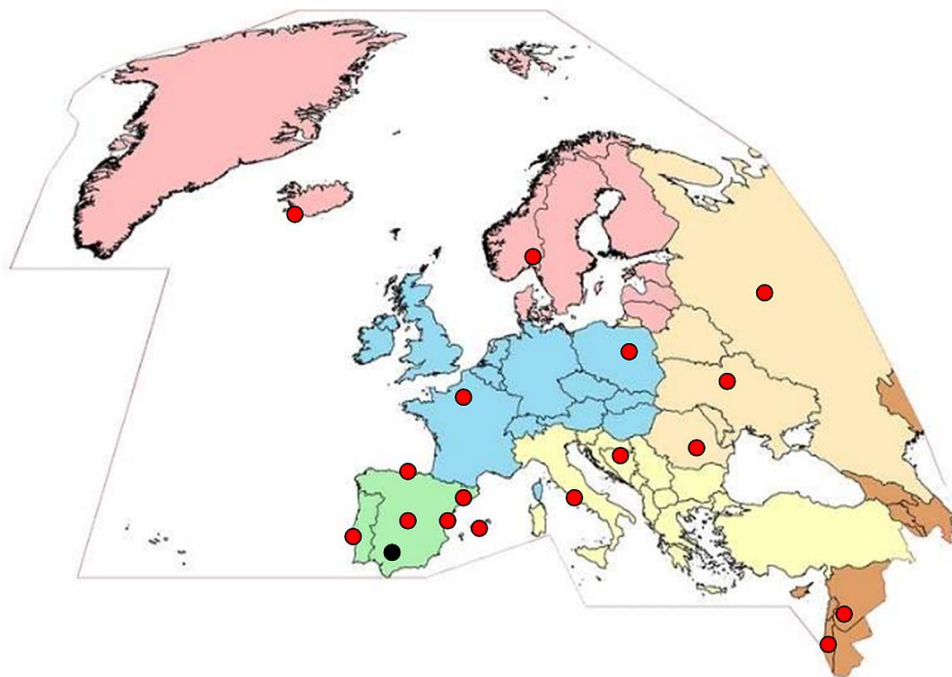


Figura 267: Ubicación en el mapa de las localizaciones seleccionadas, en negro Sevilla. P.M. Esquivias

La evolución de los valores anuales de los indicadores de iluminación natural e insolación [Figura 268, Tabla 60] muestra cómo a medida que varía la *disponibilidad de luz natural* y la insolación, intrínsecas a las condiciones climáticas de cada localización, se producen variaciones en el ambiente interior.

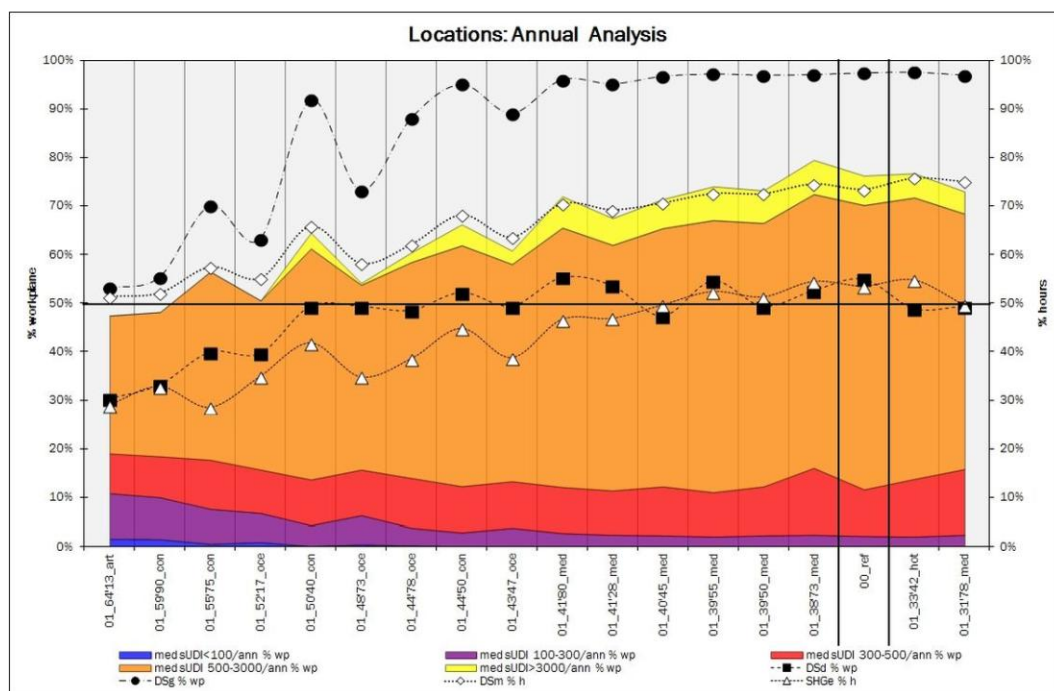


Figura 268: Serie 1: Localización. Indicadores anuales. P.M. Esquivias

En general los indicadores *Suficiencia de Iluminación Natural Global, Difusa, Mantenido, Insolación excesiva e Iluminancia Natural Útil Simultánea (DSg, DSd, DSm, SHGe, sUDI<sub>500-3000</sub> y sUDI<sub>>3000</sub>)* presentan una evolución ascendente con la disminución de la latitud de la localización del proyecto, mientras que *sUDI<sub><100</sub>* y *sUDI<sub>100-300</sub>* disminuyen y *sUDI<sub>300-500</sub>* presenta una cierta estabilidad.

La aparición en el plano de trabajo de situaciones extremas de iluminancia, por defecto o por exceso, parece que se complementan de forma que, salvo en el caso de Banja Luka (01\_44'78\_mar) y París (01\_48'73\_mar), o bien se tiene una porción del plano de trabajo infraluminada o sobreiluminada.

La curva *DSg* muestra altas variaciones en las localizaciones cuya latitud es mayor de 42°, con tendencia a disminuir su valor a medida que aumenta la latitud. Sin embargo presenta un comportamiento estable en latitudes menores pudiendo ser un indicador de saturación de las condiciones de iluminación natural. Sin embargo *DSd* muestra un comportamiento más estable, salvo en latitudes mayores de 52°, con valores alrededor del 50% como valor central anual.

Cabe destacar que sólo 6 de las 18 localizaciones tienen unas condiciones climáticas tales que se cumple con el *criterio de Suficiente Luz Natural* de 300 lux el 50% del tiempo en el 50% del plano de trabajo. Estas localizaciones se encuentran en una latitud menor o igual a 44°50'. También es destacable la presencia de 5 localizaciones con el mismo valor de *DSd* (49.35%) distribuidas en latitudes comprendidas entre 50° y 31°.

La contribución anual de la componente difusa para alcanzar 300 lux durante el 50% de las horas diurnas es relevante en cuanto que en las condiciones de menor *disponibilidad de luz natural* exterior ofrece una cobertura anual del 30%, sin embargo al considerar también la componente directa todos los modelos superan el 50% del plano de trabajo. La diferencia entre ambos

indicadores,  $DSg$  y  $DSd$ , varía entre un 20% y casi el 50%. La mayor diferencia se concentra en las localizaciones con menores latitudes, con climas que se caracterizan por una mayor presencia de días soleados.

Considerando sólo el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia simultánea útil para el desarrollo de tareas visuales de media y alta precisión se obtiene la *Iluminancia Natural Útil simultánea* entre 300 y 3000 lux, que coincide con la iluminancia útil suficiente.

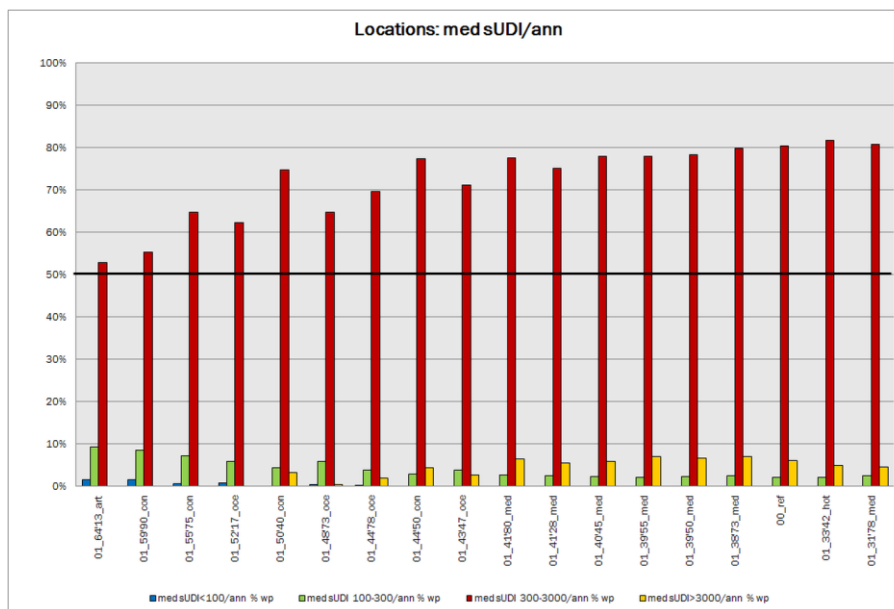


Figura 269: Localización. mediana anual  $sUDI$ . P.M. Esquivias

Se puede observar que, pese a la menor disponibilidad de luz natural en las latitudes más altas, se alcanza una cobertura del plano de trabajo mayor del 50%.

	$sUDI$ /med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	$DSd$	$DSg$	$DSm$	$SHGe$
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
01_64'13_art	1.55%	9.27%	8.20%	28.42%	0.00%	30.20%	53.03%	51.38%	28.97%
01_59'90_con	1.43%	8.56%	8.44%	29.73%	0.00%	33.06%	55.29%	52.13%	32.82%
01_55'75_con	0.48%	7.13%	10.11%	38.76%	0.00%	39.83%	69.92%	57.48%	28.51%
01_52'17_oce	0.83%	5.95%	8.92%	34.84%	0.00%	39.60%	63.14%	55.19%	34.86%
01_50'40_con	0.00%	4.28%	9.39%	47.56%	3.21%	49.35%	91.80%	65.86%	41.79%
01_48'73_oce	0.36%	5.95%	9.39%	38.05%	0.36%	49.35%	73.13%	58.23%	34.76%
01_44'78_oce	0.12%	3.69%	10.17%	44.47%	1.96%	48.51%	87.99%	62.14%	38.46%
01_44'50_con	0.00%	2.85%	9.45%	49.58%	4.28%	52.20%	95.01%	68.18%	44.76%
01_43'47_oce	0.00%	3.80%	9.51%	44.71%	2.73%	49.35%	89.06%	63.61%	38.73%
01_41'80_med	0.00%	2.73%	9.39%	53.39%	6.42%	55.29%	95.96%	70.50%	46.60%
01_41'28_med	0.00%	2.38%	9.04%	50.54%	5.47%	53.63%	95.12%	69.25%	46.82%
01_40'45_med	0.00%	2.26%	9.99%	53.15%	5.95%	47.32%	96.67%	70.67%	49.57%
01_39'55_med	0.00%	2.02%	9.04%	56.00%	6.90%	54.58%	97.15%	72.60%	52.32%
01_39'50_med	0.00%	2.26%	9.99%	54.22%	6.66%	49.35%	96.91%	72.59%	51.21%
01_38'73_med	0.00%	2.38%	13.67%	56.36%	7.02%	52.56%	97.03%	74.59%	54.38%
00_ref	0.00%	2.14%	9.51%	58.50%	6.06%	54.93%	97.38%	73.48%	53.43%
01_33'42_hot	0.00%	2.02%	11.77%	57.91%	4.99%	48.87%	97.50%	75.81%	54.68%
01_31'78_med	0.00%	2.38%	13.44%	52.56%	4.52%	49.35%	96.91%	75.07%	49.55%

Tabla 60: Serie 1: Localización. Indicadores anuales

Tal como afirmaban *C.M. Muñoz, P.M. Esquivias et al.* [279], la diferencia en cada localización entre el indicador de iluminancia global y difusa se puede entender como un cierto indicador de la frecuencia de días despejados, así como de la adecuación del uso del *Factor de Iluminación Natural*, incluso si éste es en base climática, para el cálculo de las condiciones de iluminación natural.

En ambos casos, Kiev se señala como un caso excepcional dentro de la clasificación por latitud, lo cual indica que la clasificación de las condiciones climáticas y, por ende, de las recomendaciones basadas en la latitud, no es la más adecuada, debiendo buscarse otros parámetros inherentes al clima para ello, como puede ser la clasificación climática de *Köppen*.

En este contexto se observa que las localizaciones con clima continental presentan mayores diferencias entre los indicadores que aquellas que tienen clima oceánico y ártico; y que en las localizaciones con clima mediterráneo y semi-árido esta diferencia oscila entre el 40-50%. Tal como afirma *Muñoz*: “*en las regiones del norte de Europa es posible seguir considerando sólo la iluminancia difusa debido a la relativamente escasa diferencia con respecto a considerar la iluminancia total, en las regiones con latitudes menores de 50°, se debería considerar siempre la iluminancia total en los estudios de iluminación natural.*”

Aunque ambos estudios se centran en las mismas localizaciones, una de las grandes diferencias reside en los indicadores utilizados. El artículo se basa en resultados de *Autonomía de Luz Natural (DA)* y en el antiguo esquema de *Iluminación Natural Útil (UDI)*, ambos indicadores obtenidos mediante análisis acumulativo del perfil de iluminancias.

Si comparamos los resultados anuales de obtención de iluminancias menores de 100 lux, en principio indicador común, se observa que mediante el análisis acumulativo se obtienen diferentes valores, pero mediante el análisis temporal realizado en esta investigación, los resultados anuales de *sUDI<100* son prácticamente 0. Es decir que mientras el porcentaje del plano de trabajo que, para el rango temporal, tiene una iluminancia menor de 100 lux puede llegar a ser del 35% en Reykjavik, el porcentaje que simultáneamente alcanza dicha iluminancia es del 1'55%.

Por otro lado, se observa un cierto paralelismo entre la curva *DSg*, *DSm* y la presencia de *sUDI>3000* en el espacio, que también puede correlacionarse con el indicador *SHGe*. De esta forma, el indicador *sUDI>3000* adopta un valor central anual de aproximadamente 0% cuando el indicador *DSg* es menor de 75%, *DSd* es menor de 60% y *SHGe* es menor de 35%. *sUDI>3000* es mayor de 4% con un *DSg* mayor del 95%, un *DSd* mayor de 68% y un *SHGe* mayor de 44%.

Del mismo modo también se observa que si *DSg* es mayor del 90% entonces el valor central anual de *sUDI<100* es del 0%, aunque no se puede establecer este tipo de relación con los indicadores *DSd* y *SHGe*. Además, para valores de *DSg* mayores del 95% el valor de *sUDI<100-300* es menor del 3%.

Aunque cuando se trabaja con el concepto de *Factor de Iluminación Natural* se considera que la latitud es el parámetro clave de su variación en función de dónde se localiza el proyecto arquitectónico, se observa que para localizaciones con prácticamente la misma latitud, como Banja Luka (44°78') y Bucharest (44°50'), la contribución de la componente difusa de la luz natural ofrece resultados diferentes, con mayor diferencia si se trata de la contribución global, debido a las características de las condiciones climáticas locales.

Si atendemos a la mediana de la *iluminancia exterior horizontal* ( $E_{h, med}$ ), global y difusa, en los archivos climáticos de cada una de las localidades e incorporamos la información sobre su *clasificación climática Köppen* [Figura 270] se observa que Banja Luka tiene un clima Oceánico, con

veranos templados e inviernos suaves, mientras que Bucharest tiene un clima Continental húmedo, con veranos cálidos e inviernos fríos.

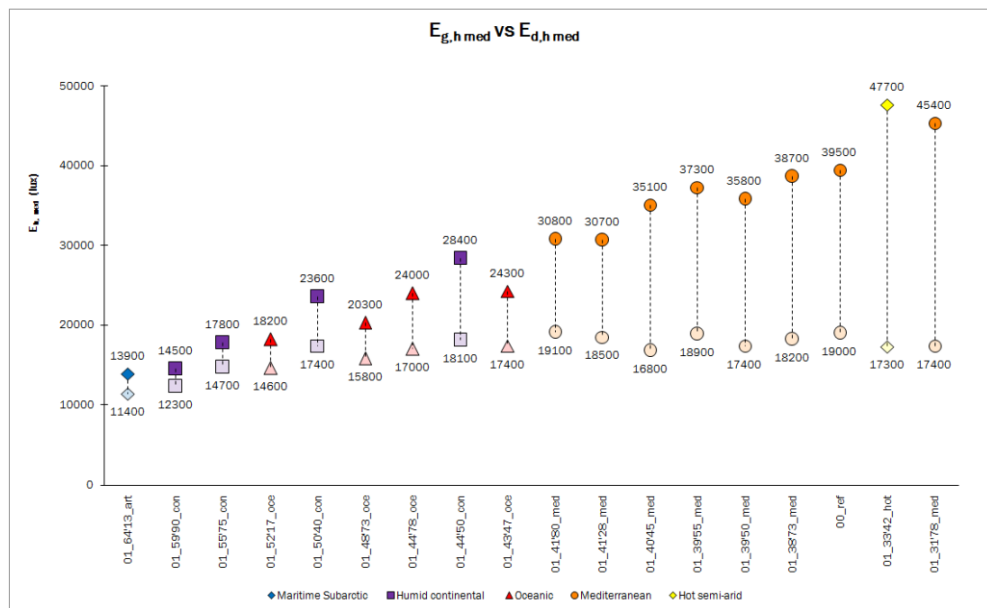


Figura 270: Iluminancia Exterior Horizontal global (color sólido) y difusa (color suave) con una frecuencia del 50% de las horas diurnas según los datos registrados en los archivos climáticos estandarizados. P.M. Esquivias

La diferencia entre la *iluminancia exterior horizontal* global y difusa que guardan las localizaciones de clima Oceánico con similar latitud (Banja Luka y Santander) es parecida mientras que dicha diferencia aumenta en el clima Continental húmedo, lo cual corresponde con las diferencias encontradas en los indicadores. Asimismo, se observa que, en función de cada tipo de clima, la relación entre el valor de  $E_{g,h,med}$  y  $E_{d,h,med}$  guarda una cierta proporción que aumenta a medida que disminuye la latitud.

Probablemente cada tipo de clima vendrá caracterizado por la proporción de días nublados y días soleados, que como consecuencia proporciona estas diferencias de iluminancias. Por lo que, para establecer una relación más concluyente sobre la *disponibilidad de luz natural* exterior y las condiciones de iluminación natural e insolación interior es necesario realizar un estudio de mayor profundidad sobre los parámetros que caracterizan y definen a cada tipo de clima.

Sin embargo se concluye que en las localizaciones con un valor central anual de  $E_{g,h,med}$  mayor de 28400 lux se obtiene una *Suficiencia de Iluminación Natural Global (DSg)* mayor del 95%. Esta condición se da en todas las localizaciones con clima mediterráneo, con clima cálido semiárido y en Bucharest. Del mismo modo se observa que con una  $E_{g,h,med}$  mayor de:

- 23600 lux se puede obtener un *DSg* mayor del 88%
- 17800 lux se puede obtener un *DSg* mayor del 63%
- 13900 lux se puede obtener un *DSg* mayor del 53%

En el contexto de la contribución difusa, se observa que para una  $E_{d,h,med}$  mayor de 18000 lux se obtiene una *Suficiencia de Iluminación Natural Difusa (DSd)* mayor del 50%; para una  $E_{d,h,med}$  entre 15000 lux y 18000 lux se obtiene un *DSd* del 40% al 50%; y para una  $E_{d,h,med}$  entre 11400 lux y 15000 lux se obtiene un *DSd* menor del 30% al 40%.

Estos valores parecen contrastar con los valores de iluminancia horizontal exterior utilizados hasta ahora para la determinación del *Factor de Iluminación Natural*. Si bien es cierto que tanto el ábaco de la *CIE* [63], como la fórmula de *Tregenza* [102] como el ‘Cielo de diseño’ [105] se centran

en un horario de aprovechamiento de la luz natural de 9'00h a 17'00h, homogéneo a lo largo del año y menor a las horas diurnas, y en una frecuencia anual del 85%, luego las bases de cálculo difieren. No obstante, aunque en el ábaco de la *CIE* no aparece la curva del 50%, si existiera, se observa que el valor que arrojaría para Reykjavik sería bastante similar al obtenido de  $E_{d,h med}$ . Se puede decir entonces que el estudio realizado está en consonancia con los resultados anteriores.

También se constata que los valores obtenidos de  $E_{d,h med}$  para las diferentes localizaciones de estudio corresponden, con una diferencia máxima de 100 lux, con los valores obtenidos por *Mardaljevic y Christoffersen* [50] [224] en los estudios realizados para el proyecto normativo Europeo sobre iluminación natural, por lo que los valores que proporcionan de *Factor de Iluminación Natural objetivo* coinciden con el *Factor de Iluminación Natural en base climática ( $DF_{cb}$ )* recogido para cada localización para una iluminancia interior de 100, 300, 500 y 750 lux [Anexo A: Factor de Iluminación Natural en base climática].

La diferencia del valor de los diferentes indicadores respecto al modelo de referencia se muestra gráficamente en la Figura 271, Figura 272 y en la Tabla 61. Como el indicador  $sUDI_{<100}$  en el modelo de referencia es 0%, éste no se incluye en el cálculo de la relación proporcional.

En lo relativo a los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural* y de insolación se observa que las mayores variaciones se producen a medida que aumenta la latitud, es decir, que en Reykjavik es donde se encuentra la mayor diferencia de valores respecto al modelo de referencia. En todos los casos, esta diferencia de valores resulta negativa, es decir, que a medida que aumenta la latitud disminuye el valor absoluto del indicador. Los indicadores  $DSg$ ,  $DSd$  y  $SHGe$  presentan una reducción de hasta casi el 50% del valor del modelo de referencia, mientras  $DSm$  tiene una reducción máxima del 30%. Sin embargo ninguno de los cuatro indicadores presenta un incremento significativo de los valores del modelo de referencia, siendo de apenas un 2-3%.

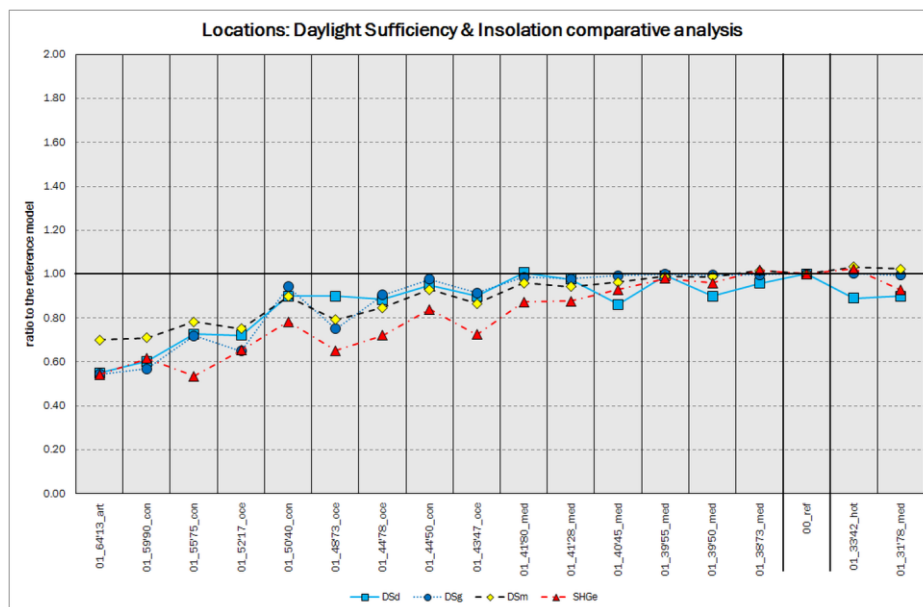


Figura 271: Variación de los indicadores  $DSg$ ,  $DSd$ ,  $DSm$  y  $SHGe$  respecto al modelo de referencia debido a la localización. P.M. Esquivias

Al igual que con los otros indicadores, a medida que se aumenta la latitud se reducen los valores de casi todos los indicadores alcanzando la máxima variación en Reykjavik. Se observa que, salvo en tres casos, el indicador  $sUDI_{300-500}$  permanece prácticamente constante con una reducción máxima del 14% del valor de referencia. El siguiente indicador con menor variación es  $sUDI_{500-3000}$  que presenta en todos los casos valores menores al modelo de referencia llegando a ser, en el caso

de mayor reducción, hasta el 49% del valor de referencia. Todas las localizaciones con clima mediterráneo y cálido semiárido presentan reducciones menores del 10%.

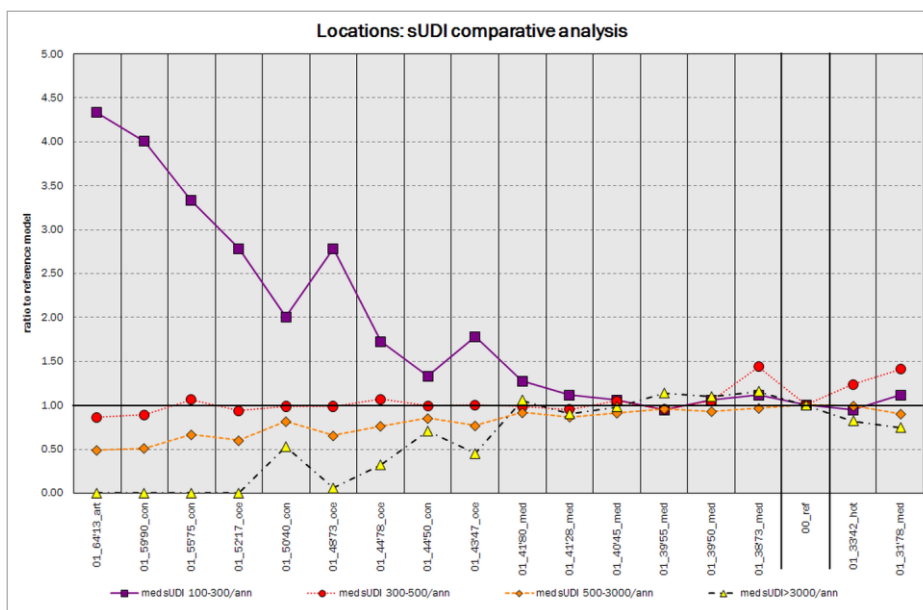


Figura 272: Variación del conjunto de indicadores *sUDI* debido a la localización. P.M. Esquivias

El indicador *sUDI*<sub>>3000</sub> presenta relativamente grandes variaciones en cuanto que se anula su valor en las localizaciones con mayor latitud, obteniéndose en estos casos un factor de proporcionalidad de 0, o puede superar en hasta un 16% el valor del modelo de referencia. El indicador *sUDI* que mayor variación presenta es el correspondiente al rango de iluminancias 100-300 lux, siendo hasta 4 veces el valor de referencia en las localizaciones de mayor latitud.

	<i>sUDI</i> med/ann				Daylight Sufficiency			<i>SHGe</i>
	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	
01_64'13_art	4.33	0.86	0.49	0.00	0.55	0.54	0.70	0.54
01_59'90_con	4.00	0.89	0.51	0.00	0.60	0.57	0.71	0.61
01_55'75_con	3.33	1.06	0.66	0.00	0.73	0.72	0.78	0.53
01_52'17_oce	2.78	0.94	0.60	0.00	0.72	0.65	0.75	0.65
01_50'40_con	2.00	0.99	0.81	0.53	0.90	0.94	0.90	0.78
01_48'73_oce	2.78	0.99	0.65	0.06	0.90	0.75	0.79	0.65
01_44'78_oce	1.72	1.07	0.76	0.32	0.88	0.90	0.85	0.72
01_44'50_con	1.33	0.99	0.85	0.71	0.95	0.98	0.93	0.84
01_43'47_oce	1.78	1.00	0.76	0.45	0.90	0.91	0.87	0.72
01_41'80_med	1.28	0.99	0.91	1.06	1.01	0.99	0.96	0.87
01_41'28_med	1.11	0.95	0.86	0.90	0.98	0.98	0.94	0.88
01_40'45_med	1.06	1.05	0.91	0.98	0.86	0.99	0.96	0.93
01_39'55_med	0.94	0.95	0.96	1.14	0.99	1.00	0.99	0.98
01_39'50_med	1.06	1.05	0.93	1.10	0.90	1.00	0.99	0.96
01_38'73_med	1.11	1.44	0.96	1.16	0.96	1.00	1.02	1.02
00_ref	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
01_33'42_hot	0.94	1.24	0.99	0.82	0.89	1.00	1.03	1.02
01_31'78_med	1.11	1.41	0.90	0.75	0.90	1.00	1.02	0.93

Tabla 61: Serie 1: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia

Mientras los rangos centrales de iluminancias útiles, entre 300 y 3000 lux, presentan una mayor estabilidad a pesar del cambio de las condiciones climáticas locales, son los rangos extremos los

que presentan la mayor variación respecto a las condiciones de iluminación natural del modelo de referencia.

Para analizar la evolución mensual, se toman el indicador de *Suficiencia de Iluminación Natural global* [Figura 273], el indicador de *Insolación Excesiva* [Figura 274] y el indicador de *Iluminancia Natural Útil simultánea* entre 500 y 300 lux [Figura 275], y se restringe el número de modelos a los valores extremos de los cuatro tipos de clima identificados en la región de estudio, de forma que se refleja la evolución mensual de los tres indicadores para ocho localizaciones diferentes.

En la gráfica se observa que la curva de *DSg* comienza siendo de forma parabólica en el clima más frío y termina siendo prácticamente llana en el clima más cálido. Dentro del mismo tipo de clima también se observa el mismo comportamiento: en la localización con latitud mayor su comportamiento es parabólico, con mayor suficiencia en verano que en invierno y gradualmente se va allanando a medida que disminuye la latitud. Este comportamiento se ve más acentuado en el clima continental y oceánico que en el clima mediterráneo, que parte de una curva bastante llana y con alto valor de *DSg*.

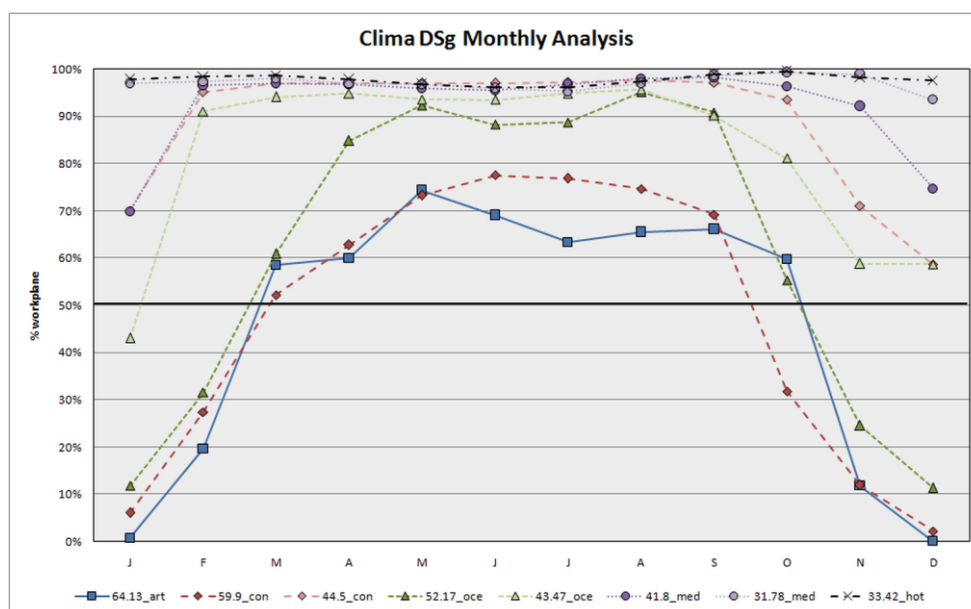


Figura 273: Valores mensuales de *DSg* de las localizaciones escogidas. P.M. Esquivias

En lo referente a la *Insolación Excesiva*, todas las localizaciones presentan aproximadamente el mismo comportamiento: una mayor insolación durante el invierno que desciende durante los meses estivales. Sin embargo, en las localizaciones con altas latitudes, con un *DSg* <50% de Octubre a Febrero, la insolación invernal es igual o menor a la obtenida durante el verano. Mientras en invierno aumenta la dispersión de valores, en verano se reduce obteniendo un rango de variación del 18%, aproximadamente.

Respecto al porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente entre 500 y 3000 lux se observa un comportamiento parecido a las curvas que describen la *insolación excesiva* en el espacio y también similar a las curvas de *DSg*.

Las curvas presentan una gran dispersión y oscilación de valores durante los meses de invierno que convergen en torno al solsticio de verano, así también las localizaciones con una mayor latitud describen una curva parabólica que se aproxima a una curva cosenoidal, con mínimo en Junio y máximo en invierno. Tal como sucedía con las curvas *DSg*, dentro del mismo tipo de clima también se observa el mismo comportamiento.



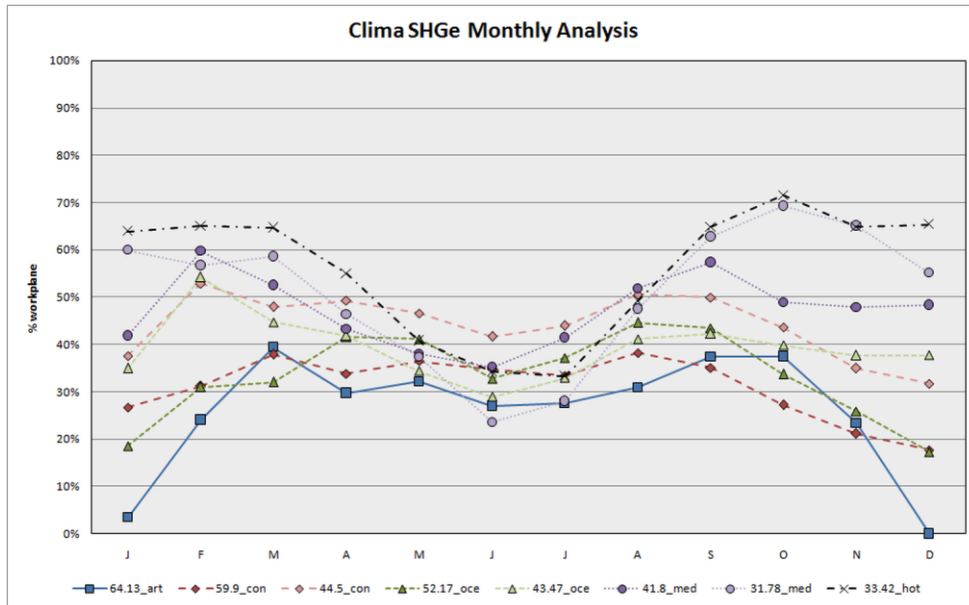


Figura 274: Valores mensuales de SHGe para las localizaciones escogidas. P.M. Esquivias

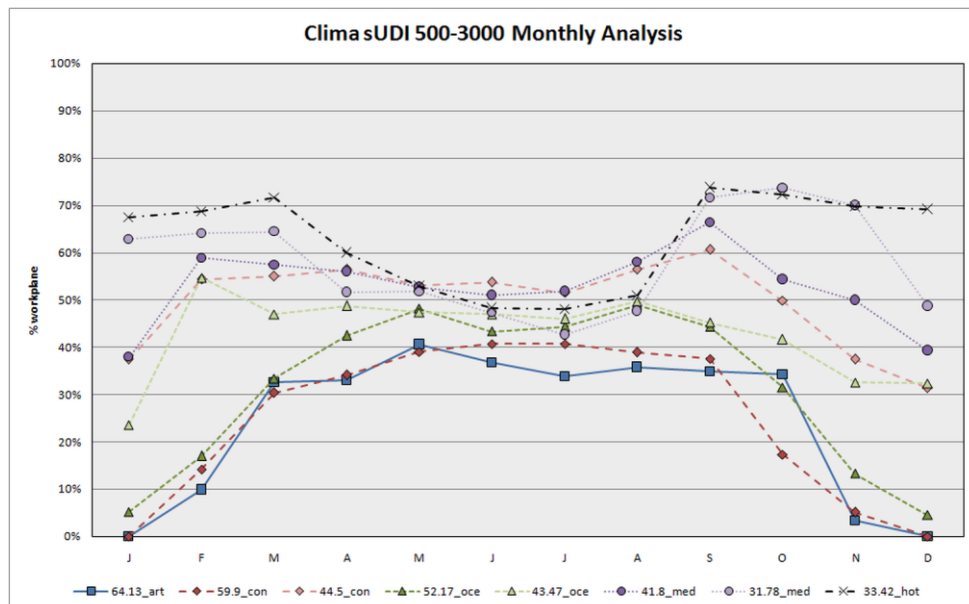


Figura 275: Valores mensuales de sUDI 500-3000 para las localizaciones escogidas. P.M. Esquivias

Atendiendo al efecto de cada tipo de clima se observa del análisis de los resultados individuales, recogidos en las «fichas de análisis-síntesis» [Anexo B] que en aquellas localizaciones pertenecientes a climas mediterráneo y cálido semiárido se obtiene la mayor proporción del plano de trabajo en un rango de iluminancias entre 300 y 3000 lux de Abril a Agosto con una *insolación excesiva* menor del 50% de las horas diurnas, necesitando de protección solar para reducir la insolación y la presencia de zonas del plano de trabajo con una iluminancia mayor de 3000 lux, por tanto con riesgo de aparición de situaciones de deslumbramiento, de Septiembre a Marzo.

En las localizaciones con clima oceánico, la mayor proporción del plano de trabajo entre 300 y 3000 lux se extiende de Abril a Septiembre, con una *insolación excesiva* generalmente entre el 50% y el 30% de las horas diurnas. Sin embargo, para una *insolación excesiva* mensual menor del 30%, que suele tener lugar de Noviembre a Febrero, aparecen zonas con una iluminancia menor de 100 lux, por lo que habría que aumentar la captación de *radiación solar*.

En las localizaciones con clima continental el periodo con las mejores condiciones útiles de iluminación se extiende de Marzo a Septiembre, con una insolación entre el 50% y el 40% para latitudes inferiores a 50° y entre el 40% y el 30% para latitudes mayores. En el resto del año se disminuyen las condiciones óptimas por aparición de zonas con menor *iluminancia*. El mismo comportamiento que para clima continental con latitud mayor de 50° presenta la localización con clima ártico, requiriendo de un aumento de la captación de radiación solar especialmente de Noviembre a Febrero.

En todas las localizaciones se observa en sus mapas temporales que el mayor porcentaje del plano de trabajo que alcanza una iluminancia entre 300 y 3000 lux se puede delimitar en un rango horario comprendido entre las 9'00h y las 18'00h, incluso en las mayores latitudes, por lo que este horario podría considerarse el óptimo para el aprovechamiento de la luz natural en horario laborable. En este sentido, los resultados concuerdan con lo expresado por *Mardaljevic y Christoffersen* [224].

### 4.3 Potencialidad del emplazamiento

---

La presencia de los elementos del entorno, como otros edificios, árboles o accidentes geográficos actúan como obstáculos que reducen la entrada de la luz natural a los edificios, bloqueando tanto la *radiación solar directa* como zonas de la bóveda celeste [3], es decir, la incidencia de *radiación solar difusa*.

Además, la orientación de las fachadas que contienen a los huecos determinará el acceso a la radiación solar de los edificios, no sólo por cuestiones lumínicas, sino también para aprovechar dicha radiación en invierno para ser utilizada como calefacción pasiva del edificio y diseñar las adecuadas protecciones para la época estival [3].

Los elementos del entorno forman parte de las condiciones de partida del proyecto arquitectónico, la orientación de las fachadas se define en las primeras etapas de diseño; ambos aspectos determinan no sólo las condiciones de iluminación natural sino también la exposición a la radiación solar directa a la que se va a ver sometidas las superficies de la envolvente térmica del edificio.



### 4.3.1 Elementos del entorno

Manteniendo una distancia de separación entre la fachada donde se encuentra el hueco y la obstrucción en 1 m, por cada ángulo de obstrucción, medido como la elevación de la obstrucción frontal respecto al alféizar de la ventana, cuya altura es de 1,025 m, se determina la altura de la obstrucción y la inclinación respecto a la horizontal, expresada en porcentaje, siendo la tangente del ángulo de obstrucción. La presencia de obstáculos también supondrá el incremento de la componente reflejada exterior por reflexión en las superficies del entorno, por lo que, en base al Estado del Arte se ha fijado un coeficiente de reflexión de los elementos del entorno del 50%.

En la Tabla 62 se muestran los valores seleccionados del ángulo de obstrucción, que es la variable independiente, la altura del obstáculo y la pendiente respecto a la horizontal desde el alféizar son las variables dependientes. La distancia de separación se fija en un valor constante de 1 m y la extensión igual a la anchura de la fachada [Figura 276].

Nº	Ángulo (°)	Distancia (m)	Altura (m)	Pendiente (%)
1	0°	1 m	0.000 m	0.00%
2	15°	1 m	1.293 m	26.79%
3	30°	1 m	1.602 m	57.74%
4	45°	1 m	2.025 m	100.00%
5	60°	1 m	2.757 m	173.21%
6	75°	1 m	4.757 m	373.21%

Tabla 62: Valores del ángulo de obstrucción y de sus variables dependientes

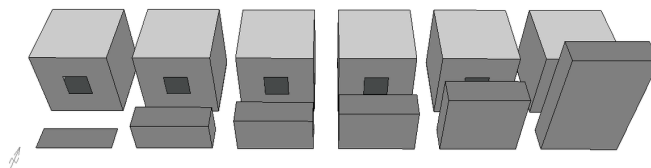


Figura 276: Definición geométrica de los modelos de cálculo en *Ecotect*. De izquierda a derecha: ángulo de obstrucción de 0°, 15°, 30°, 45°, 60° y 75°. P.M. Esquivias.

La evolución de los valores anuales de las condiciones de iluminación natural e insolación debido a la variación del ángulo que guarda un elemento ubicado frente a la ventana respecto al alféizar de la misma se muestra en la Figura 277 y en la Tabla 63.

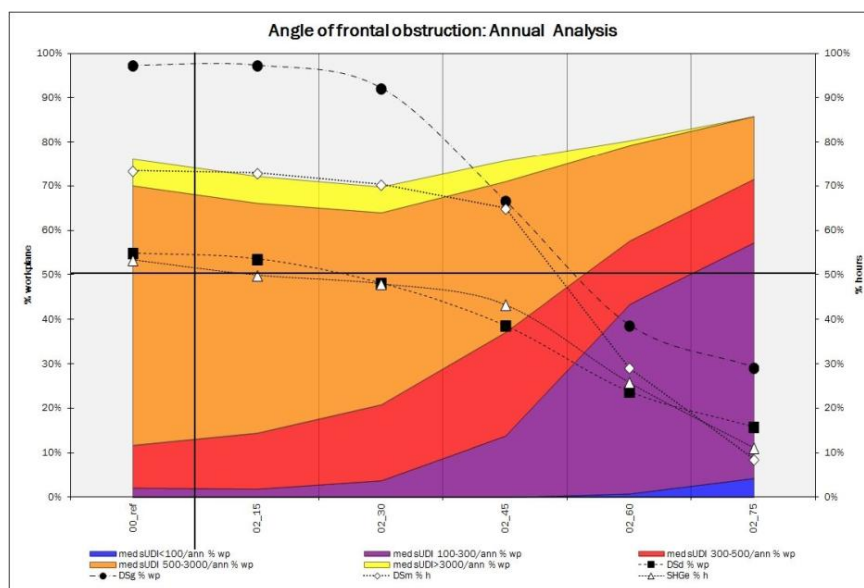


Figura 277: Serie 2: Ángulo de obstrucción frontal. Indicadores anuales. P.M. Esquivias

Se observa cómo a medida que se incrementa el ángulo de obstrucción se disminuye el porcentaje del plano de trabajo que alcanza 300 lux durante el 50% de las horas diurnas, ya sea por contribución de la componente difusa exclusivamente (*Suficiencia de Iluminación Natural difusa-DSa*) o debido a la iluminancia global (*Suficiencia de Iluminación Natural global-DSg*) a partir de un ángulo de obstrucción de 15°, en concordancia también con lo observado en el Estado del Arte [16] [226] [277] [279].

Ambos indicadores muestran comportamientos similares, con curvas compuestas por tres tramos lineales cuyos puntos de inflexión se encuentran en los modelos cuyo ángulo de obstrucción es 30° y 60°. El requisito de Suficiente Luz Natural (*DSg*, *DSd* y *DSm* > 50%) sólo se alcanza mediante la componente difusa para ángulos de obstrucción menores de 15°, y con un ángulo de hasta 45° si consideramos también la componente directa.

El mantenimiento en el tiempo de 300 lux en el 50% del plano de trabajo también se logra con ángulos de obstrucción menores de 45°, que coincide con los modelos en que la *Iluminancia Natural Útil Simultánea sUDI<100* es nula. Hasta dicho ángulo la reducción del valor central anual muestra una reducción inversamente proporcional moderada. Sin embargo, a partir de 45° de obstrucción, la pendiente de la curva se incrementa mostrando una fuerte reducción del indicador hasta ser mínimo para una obstrucción de 75°.

Similar comportamiento se observa en la curva de *insolación excesiva (SHGe)* aunque la pendiente de ambos tramos es más suave que para el indicador *Suficiencia de Iluminación Natural mantenida (DSm)*. También cabe señalar que para un *SHGe* menor del 40% se reduce drásticamente el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia excesiva.

Considerando la iluminancia natural útil simultánea suficiente, es decir, el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 3000 lux, se observa que no se alcanza el valor mínimo de 50% a partir de un ángulo de obstrucción de 60°.

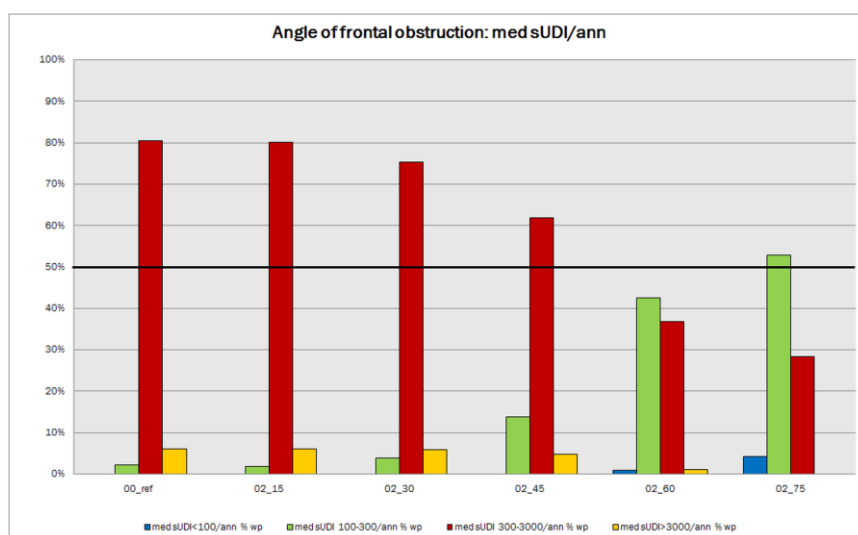


Figura 278: Ángulo de obstrucción frontal. mediana anual sUDI. P.M. Esquivias

Por otro lado, se observa que el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia comprendida entre 100 y 300 lux se incrementa a medida que aumenta el ángulo de obstrucción, de forma que se convierte en la principal contribución a las condiciones de iluminación natural del espacio para un ángulo de obstrucción frontal mayor de 45°. Esta contribución es de tal magnitud que alcanza una cobertura del plano de trabajo incluso mayor del 50% para una obstrucción de 75°.

	<i>sUDI</i> /med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	<i>SHGe</i>
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
00_ref	0.00%	2.14%	9.51%	58.50%	6.06%	54.93%	97.38%	73.48%	53.43%
02_15	0.00%	1.90%	12.49%	51.84%	6.06%	53.63%	97.38%	73.01%	49.99%
02_30	0.00%	3.80%	17.00%	43.28%	5.83%	48.16%	92.27%	70.40%	48.05%
02_45	0.00%	13.79%	23.31%	34.01%	4.76%	38.64%	66.71%	65.00%	43.37%
02_60	0.83%	42.57%	14.27%	21.64%	1.07%	23.78%	38.76%	29.13%	25.84%
02_75	4.28%	52.91%	14.39%	14.27%	0.00%	15.81%	29.25%	8.63%	11.19%

Tabla 63: Serie 2: Ángulo de obstrucción frontal. Indicadores anuales

La presencia de un elemento frente a la ventana, como pudiera ser un edificio del entorno o parte del mismo edificio cerrando un patio, provoca una reducción de las *horas de soleamiento* por interposición en la trayectoria solar [Figura 279].

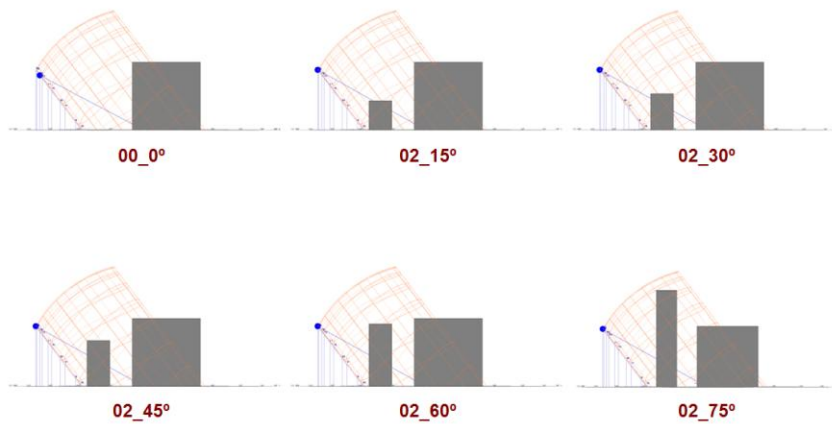


Figura 279: Posición relativa del elemento de obstrucción y la trayectoria solar anual. P.M. Esquivias

Tal como se evidenció en el análisis del modelo de referencia, la mayor insolación se produce durante el invierno produciendo los mayores resultados de *sUDI*<sub>>3000</sub>, reduciéndose a medida que se avanza hacia el solsticio de verano y aumenta la *altitud solar*. Precisamente los elementos del entorno con menor *elevación* y, por tanto, menor ángulo de obstrucción se interponen en el periodo en que se registra mayor insolación [Figura 280].

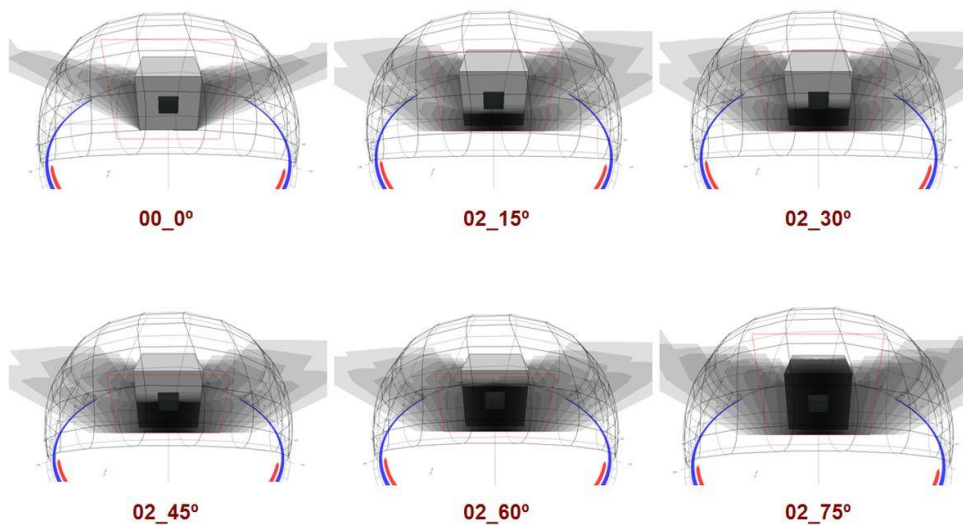


Figura 280: Sombras arrojadas sobre la fachada acristalada durante el 21 de diciembre de 09 a 18 h (GMT+1) en cada modelo de simulación de la Serie 2. P.M. Esquivias

Las sombras arrojadas sobre la ventana durante el solsticio de invierno para cada modelo muestran que para un ángulo de  $30^\circ$  comienza a ser permanente aunque sin cubrir una gran porción de la ventana, lo cual corresponde con la moderada reducción de valores de los indicadores. Sin embargo la proyección de sombras y reducción de la componente directa sobre la ventana durante el equinoccio [Figura 281] no se produce hasta que no se alcanza un ángulo de obstrucción mayor de  $45^\circ$ , que corresponde con el punto de inflexión de las curvas *DSm* y *SHGe*.

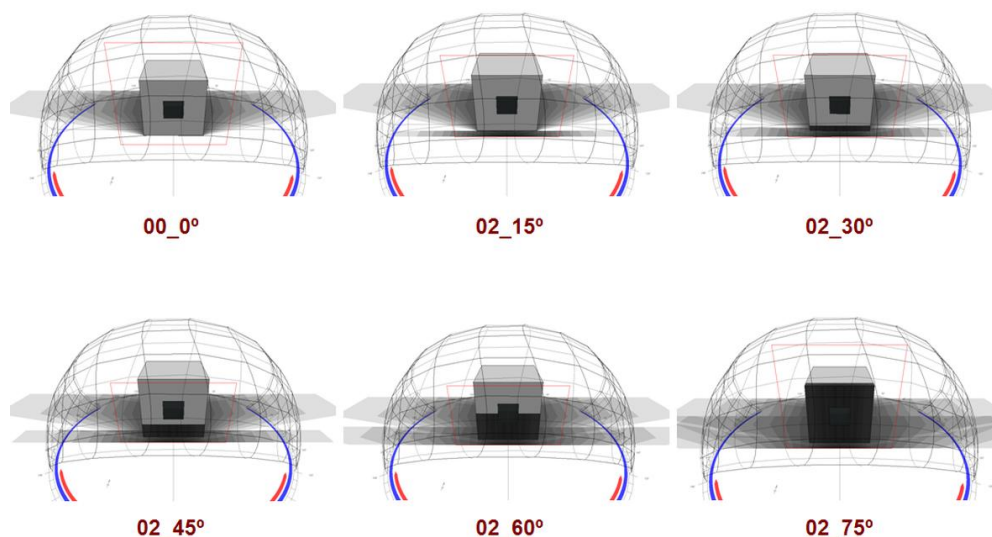


Figura 281: Sombras arrojadas sobre la fachada acristalada durante el 21 de marzo de 09 a 18 h (GMT+1) en cada modelo de simulación de la Serie 2. P.M. Esquivias

La relación proporcional de los diferentes modelos respecto al modelo de referencia se muestra en la Tabla 64 y en la Figura 282 y Figura 283. Como el indicador  $sUDI_{<100}$  en el modelo de referencia es 0%, éste no se incluye en el cálculo de la relación proporcional.

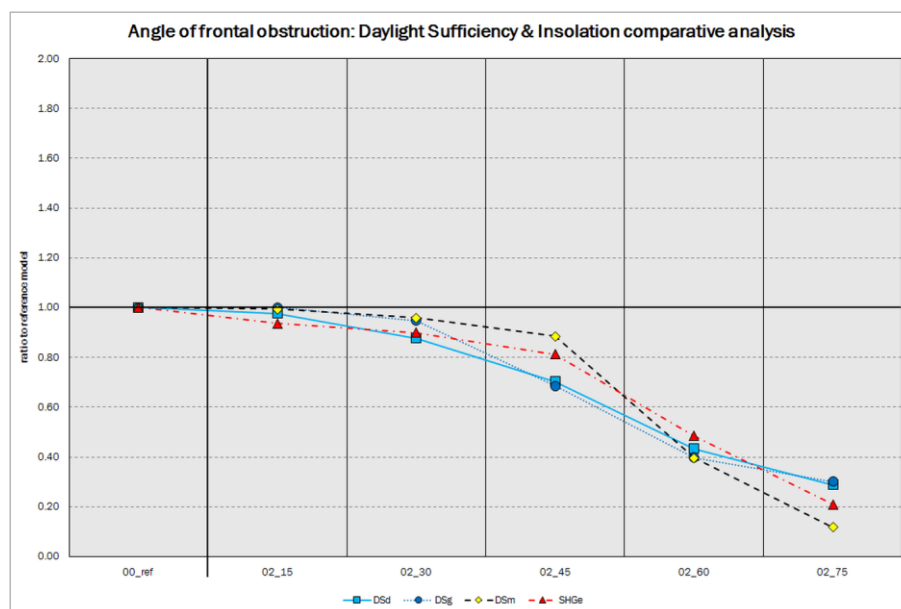


Figura 282: Variación de los indicadores *DSg*, *DSd*, *DSm* y *SHGe* respecto al modelo de referencia debido al ángulo de obstrucción. P.M. Esquivias

Se observa cómo la presencia de una obstrucción frente al hueco redonda en una reducción de los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural* e *Insolación*. En este sentido se observa que todos los indicadores presentan aproximadamente la misma reducción, produciéndose ligeras diferencias según el modelo de cálculo.



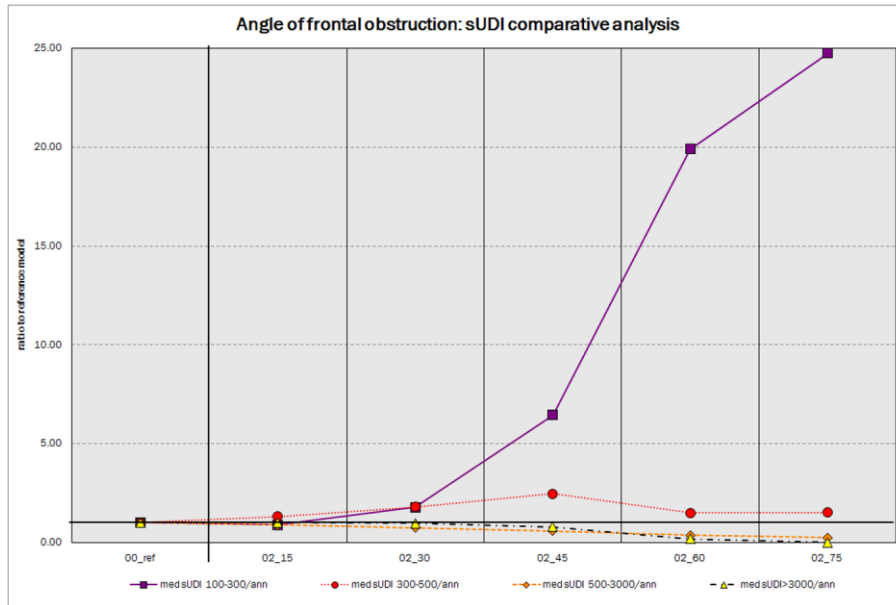


Figura 283: Variación del conjunto de indicadores *sUDI* respecto al modelo de referencia debido al ángulo de obstrucción frontal. P.M. Esquivias

Respecto a la Iluminancia Natural Útil simultánea se observa que la presencia de una obstrucción frontal incrementa con una fuerte pendiente las zonas con iluminancias entre 100 y 300 lux y de forma moderada, con máximo en la obstrucción de 45° las zonas con iluminancias entre 300 y 500 lux.

La reducción de la insolación en los modelos con un ángulo de obstrucción de hasta 30° produce una reducción de los indicadores *sUDI*<sub>500-300</sub> y *sUDI*<sub>>3000</sub> y un aumento de la porción del plano de trabajo con iluminancias entre 100 y 500 lux. La permanencia de las condiciones reducidas de insolación en los modelos con un ángulo de obstrucción mayor de 45° provoca un fuerte incremento de los indicadores *sUDI*<sub><100</sub> y *sUDI*<sub>100-300</sub>, siendo éstos los predominantes para los ángulos de obstrucción de 60° y 75°, reduciendo la *suficiencia de iluminación natural global y mantenida* de tal modo que no se alcanza un valor de 50%.

Estas dos opciones de proyecto deberán estudiarse cuidadosamente en los casos concretos de diseño arquitectónico para evitar tener espacios infraluminados, conllevando, por tanto, la dependencia de iluminación artificial.

También se observa cómo el indicador *sUDI*<sub>300-500</sub> presenta un ligero incremento en todos los modelos que puede deberse a la reducción de *sUDI*<sub>500-3000</sub>, es decir, que parte del plano de trabajo con iluminancia cercana a 500 lux, por la presencia de elementos en el entorno que obstaculizan la visión de cielo y la incidencia directa, reduce su nivel de iluminación moviéndose al rango inferior de iluminancias útiles para el desarrollo de tareas visuales.

	<i>sUDI</i> med/ann				Daylight Sufficiency			<i>SHGe</i>
	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	
00_ref	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
02_15	0.89	1.31	0.89	1.00	0.98	1.00	0.99	0.94
02_30	1.78	1.79	0.74	0.96	0.88	0.95	0.96	0.90
02_45	6.44	2.45	0.58	0.79	0.70	0.69	0.88	0.81
02_60	19.89	1.50	0.37	0.18	0.43	0.40	0.40	0.48
02_75	24.72	1.51	0.24	0.00	0.29	0.30	0.12	0.21

Tabla 64: Serie 2: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia.

Atendiendo a la evolución mensual del indicador de Suficiencia [Figura 284] y de Iluminancia Útil entre 500 y 3000 lux [Figura 286] y del indicador de insolación [Figura 285], se observa cómo la curva  $DSg$  para el modelo sin obstrucción comienza siendo prácticamente plana y a medida que asciende el ángulo de obstrucción va adquiriendo una forma cosenoidal ( $30^\circ$ ) cuyos extremos se van reduciendo hasta obtener una curva de forma parabólica para el máximo ángulo de obstrucción.

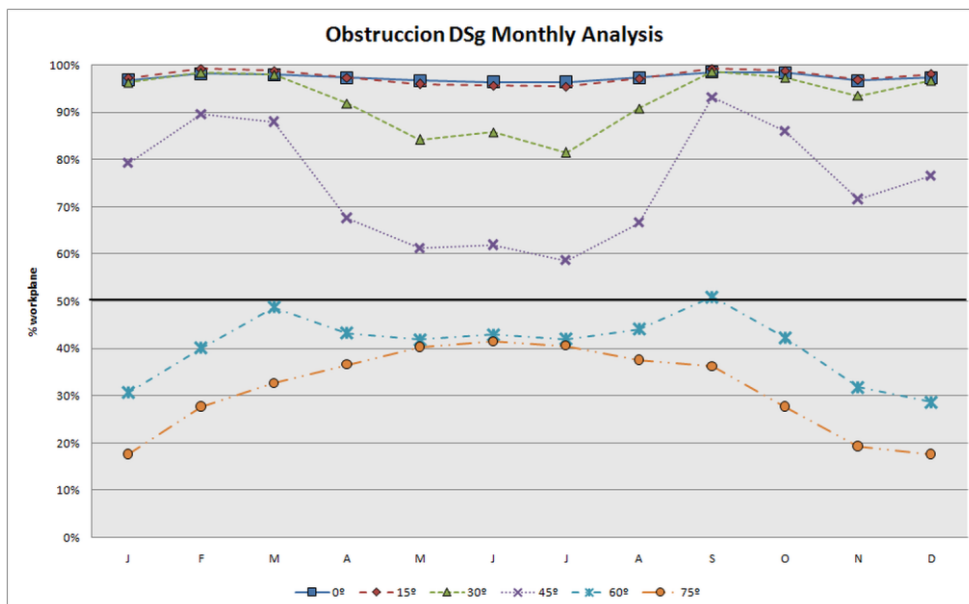


Figura 284: Valores mensuales de  $DSg$  de los ángulos de obstrucción. P.M. Esquivias

Cabe señalar que los modelos con un ángulo de obstrucción mayor de  $60^\circ$  no alcanzan en ningún momento un valor de 50%, por lo que quedarían descartadas estas opciones como estrategias de diseño arquitectónico.

Las curvas  $SHGe$  presenta, para el rango de opciones considerables para el diseño arquitectónico, prácticamente el mismo comportamiento. El modelo sin obstrucción presenta una curva con forma cosenoidal cuyos extremos se van cerrando a medida que aumenta el ángulo de obstrucción. Sin embargo la diferencia de valores entre las diferentes curvas es, como máximo, del 20% en la estación estival.

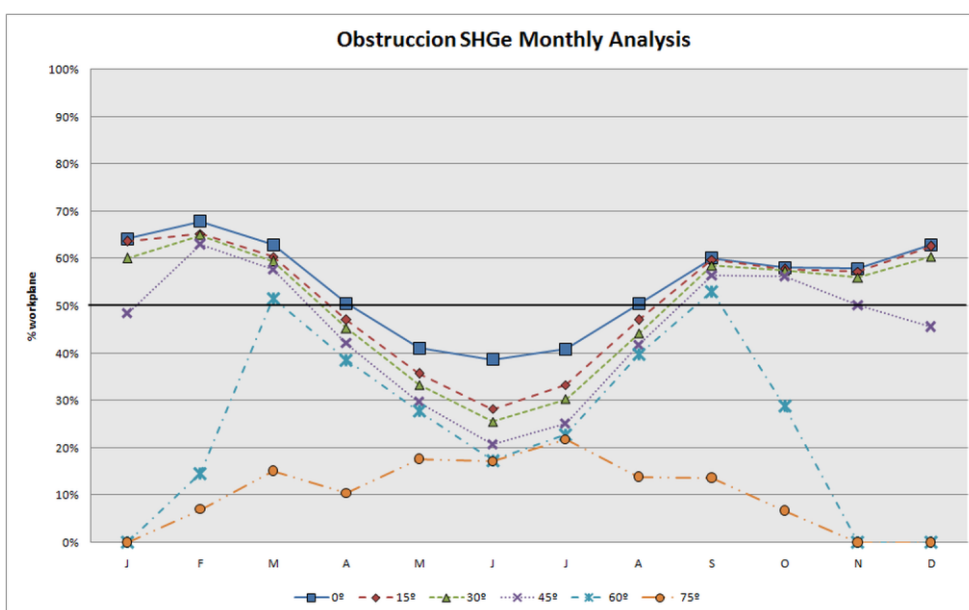


Figura 285: Valores mensuales de  $SHGe$  para los ángulos de obstrucción. P.M. Esquivias

Se observa también que la curva de 60° presenta fuertes pendientes, alcanzando los máximos en los equinoccios y los mínimos alrededor de los solsticios. La curva de 75° se aplanan hasta adquirir forma parabólica.

En cuanto a la iluminación natural útil, se observa que la presencia de una obstrucción frontal afecta al porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 500 y 3000 lux, mitigando el estado inicial para homogeneizarlo mensualmente. Los máximos y mínimos que presenta el modelo sin obstrucción se van matizando y suavizando a medida que aumenta el ángulo de obstrucción, siendo prácticamente llana la curva de 60° y con forma parabólica para un ángulo de 75°.

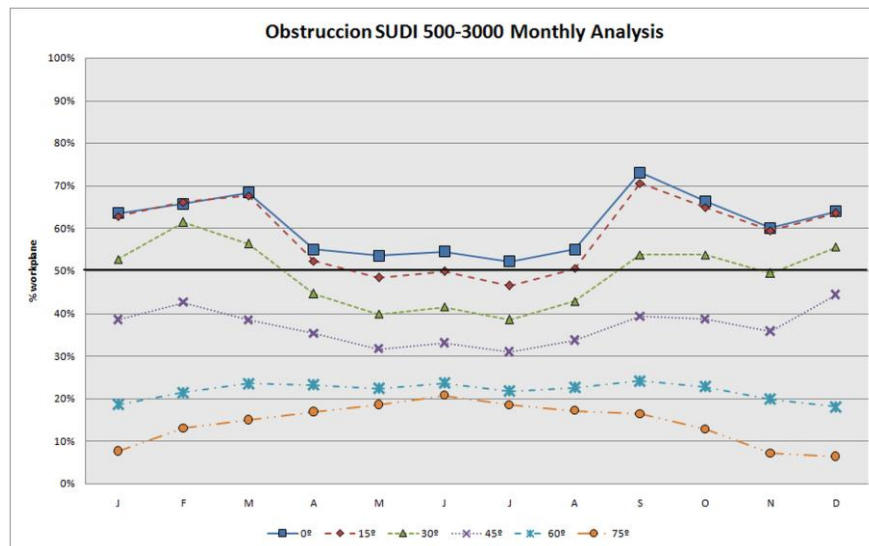


Figura 286: Valores mensuales de *sUDI 500-3000* para los diferentes ángulos de obstrucción. P.M. Esquivias

En general, la presencia de una obstrucción con un ángulo de elevación respecto al alféizar de la ventana de 15° apenas modifica las condiciones de iluminación natural e insolación del modelo de referencia. Para ángulos de obstrucción mayores o iguales a 60° no se alcanzan los objetivos de *Suficiencia de Iluminación Natural*. Con un ángulo de obstrucción de 45° se alcanza el objetivo de suficiencia minimizando las zonas con iluminancias menores de 100 lux y mayores de 3000 lux, así como la insolación excesiva.

Sin embargo, se observa que con un ángulo de obstrucción de 30° se alcanza una considerable *Suficiencia de Iluminación Natural*, así como el máximo porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia comprendida entre 500 y 3000 lux, por lo que los resultados corroboran la regla de la línea de 25° que enuncia que: “*cuando una ventana es utilizada como fuente principal de iluminación, el ángulo de obstrucción sobre el horizonte no debe ser mayor de 25°*”. En este sentido, a partir de una obstrucción de 30° se reducen considerablemente los valores de *Suficiencia de Iluminación Natural global y mantenida*.

En este contexto, se corroboran también los resultados proporcionados por otros autores. *Lukman* [226], *Reinhart* [277] y *Cammarano* [16] proponen el ángulo de 30° como el más adecuado para las condiciones de iluminación natural. Sin embargo, los tres sugieren que a partir de este valor no se obtiene suficiente iluminación natural en los espacios estudiados. No obstante, *Muñoz* [279] propone el ángulo de 45° como límite máximo de las obstrucciones frontales, coincidiendo con los resultados obtenidos en esta investigación. Así también, la definición del ángulo máximo concuerda con lo establecido en el ‘*Manual de Diseño ICARO*’ que dice que “*En calles estrechas o fachadas interiores de parcela, como es el caso de patios, conviene limitar a menos de 45° la altura angular de los obstáculos sobre la horizontal, de manera que su altura (H) sea inferior a la separación (S) (H<S)*” [230].



### 4.3.2 Orientación

Aunque en base al sistema de referencia solar, utilizado para el *ángulo azimutal*, se considera el ángulo 0° en el punto cardinal Sur, en la definición de los valores de estudio se ha mantenido el criterio del sistema georreferencial, en el que el ángulo 0° se corresponde con el punto cardinal Norte, por tener una mayor expansión y ser el utilizado también en los programas de simulación. De esta forma se tienen los siguientes valores:

N°	Orientación		Ángulo (°)
1	N	Norte N	0°
2	NNE	Nornordeste	22'5°
3	NE	Nordeste	45°
4	ENE	Estenordeste	67'5°
5	E	Este	90°
6	ESE	Estesudeste	112'5°
7	SE	Sudeste	135°
8	SSE	Sursureste	157'5°
9	S	Sur	180°
10	SSO	Sursuroeste	202'5°
11	SO	Suroeste	225°
12	OSO	Oeste suroeste	247'5°
13	O	Oeste	270°
14	ONO	Oeste noroeste	292'5°
15	NO	Noroeste	315°
16	NNO	Nornoroeste	337'5°

Tabla 65: Valores del ángulo de orientación.

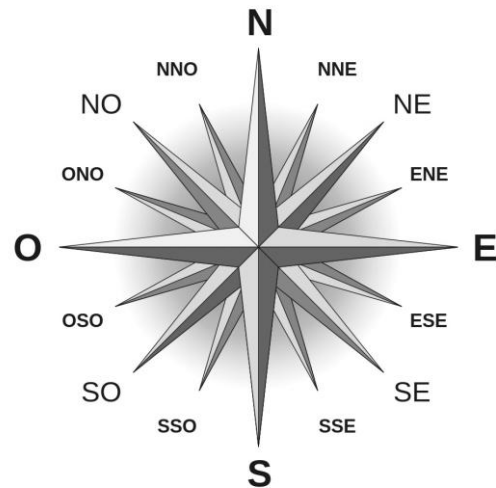


Figura 287: Rosa de los vientos donde se muestran los 16 valores de estudio

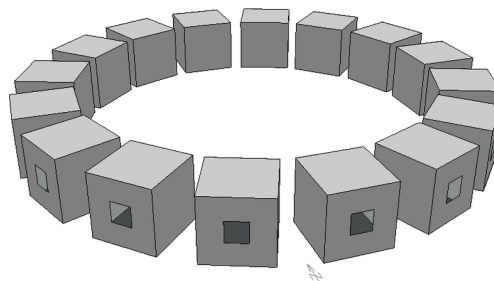


Figura 288: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie "Orientación" en Ecotect. P.M. Esquivias

El indicador *Suficiencia de Iluminación Natural difusa (DSd)* se fundamenta en la obtención del *Factor de Iluminación Natural en base climática (DF<sub>cb</sub>)* necesario para obtener 300 lux de iluminancia interior tomando como nivel de iluminación exterior la mediana de la *iluminancia horizontal exterior difusa (E<sub>d,h med</sub>)* que, según los datos recogidos en el archivo climático, tiene una frecuencia del 50% de las horas diurnas:

$$DF_{cb} = (E_{t,d} / E_{h,d med}) \times 100 = (300 \text{ lux} / E_{h,d med}) \times 100$$

Ecuación 27: Factor de Iluminación Natural en base climática

Siendo este valor *E<sub>d,h med</sub>* constante para todos los modelos de la serie Orientación y representando exclusivamente la componente difusa del cielo, sin presencia del Sol, su comportamiento es similar al *Factor de Iluminación Natural*. Si bien el elemento diferencial en el cambio de orientación es su exposición al sol, marcado por la geometría solar, es de esperar, tal como se observa en la Figura 289 y en la Tabla 66, que el indicador *DSd* permanezca constante para todos los modelos de la serie.

Por tanto, estos resultados coinciden con los realizados sobre la orientación del edificio utilizando el *Factor de Iluminación Natural* y sirve como medio de comprobación de la fiabilidad de los resultados.

	sUDI/med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	DSd	DSg	DSm	SHGe
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
03_00'00_N	0.12%	6.54%	36.98%	34.24%	0.00%	54.58%	86.21%	67.16%	2.82%
03_22'50_NNE	0.24%	8.68%	32.94%	34.48%	0.00%	54.22%	79.67%	67.61%	10.27%
03_45'00_NE	0.00%	5.11%	27.94%	36.98%	0.00%	55.17%	91.08%	70.45%	18.43%
03_67'50_ENE	0.00%	5.71%	24.14%	39.24%	0.00%	53.86%	89.89%	70.92%	27.35%
03_90'00_E	0.00%	3.80%	17.24%	46.14%	0.00%	54.82%	94.89%	72.30%	34.72%
03_112'50_ESE	0.00%	3.80%	12.25%	48.99%	0.48%	54.22%	94.53%	72.30%	41.21%
03_135'00_ES	0.00%	2.50%	9.04%	54.58%	3.33%	55.29%	96.79%	73.31%	45.97%
03_157'50_SSE	0.00%	2.62%	9.04%	53.98%	5.83%	54.34%	96.67%	72.65%	52.00%
00_ref	0.00%	2.14%	9.51%	58.50%	6.06%	54.93%	97.38%	73.48%	53.43%
03_203'50_SSO	0.00%	2.38%	9.87%	55.89%	5.95%	54.46%	97.03%	72.99%	50.31%
03_225'00_SO	0.00%	2.62%	8.20%	54.82%	2.97%	54.70%	96.79%	74.01%	46.70%
03_247'50_OS	0.00%	3.57%	12.96%	49.94%	0.00%	54.22%	95.24%	73.84%	41.02%
03_270'00_O	0.00%	3.45%	17.84%	47.44%	0.00%	55.05%	95.48%	73.12%	34.87%
03_292'50_ONO	0.00%	6.06%	25.09%	39.83%	0.00%	54.82%	90.37%	71.58%	27.93%
03_315'00_ON	0.00%	5.11%	28.78%	37.46%	0.00%	54.82%	87.16%	70.02%	17.79%
03_337'50_NNO	0.24%	8.56%	33.17%	35.55%	0.00%	54.22%	79.55%	67.56%	9.78%

Tabla 66: Serie 3: Orientación. Indicadores anuales

Del mismo modo, la evolución del indicador *insolación excesiva (SHGe)* también es coherente con la exposición solar directa que recibe cada modelo en función de la orientación de la superficie acristalada, siendo mínima en la orientación Norte (03\_00'00\_N) y máxima en la orientación Sur (00\_ref) mostrando una evolución simétrica respecto a ambos extremos. Cabe señalar que para un SHGe menor del 40% apenas hay presencia de iluminancia excesiva.

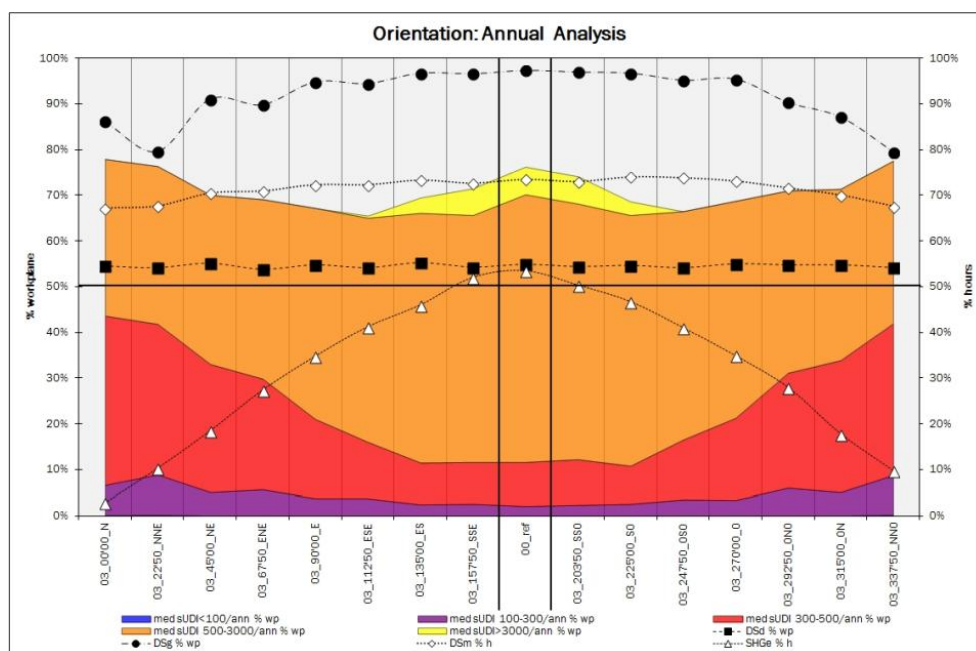


Figura 289: Serie 3: Orientación. Indicadores anuales. P.M. Esquivias

Tal como se observa en la Figura 289, la *Suficiencia de Iluminación Natural Global (DSg)* permanece prácticamente constante (~96%) desde el modelo con orientación Este (03\_90'00\_E) hasta el modelo con orientación Oeste (03\_270'00\_O) produciéndose variaciones en los demás modelos, no siempre linealmente.

Otro indicador que se mantiene relativamente constante en todos los modelos es la *Suficiencia de Iluminación Natural Mantenido (DSm)*, que es el porcentaje de las horas diurnas en que el 50% del plano de trabajo alcanza 300 lux por medios naturales. Dicho porcentaje tiene una media de 71'5% en la serie observándose un máximo en el modelo orientado al Sur (modelo de referencia) y el mínimo en el modelo orientado al Norte (03\_00'00\_N). En general, se aprecia que aparecen valores de  $sUDI_{<100}$  en aquellos modelos en que  $DSm < 70\%$ .

Los elevados valores anuales de  $DSg$  y  $DSm$  indican que el modelo espacial tiene una baja dependencia de iluminación artificial, bien porque todo el plano de trabajo alcanza 300 lux simultáneamente el 50% de las horas diurnas ( $DSg$ ) o porque el 50% del plano de trabajo alcanza simultáneamente 300 lux a lo largo del año ( $DSm$ ), y que se puede considerar suficientemente iluminado naturalmente.

Considerando la iluminancia natural útil simultánea suficiente, es decir, el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 3000 lux, se observa que todos los modelos alcanzan una cobertura mínima de alrededor del 75% del plano de trabajo. También se puede observar la leve contribución del rango entre 100 y 300 lux, de mayor intensidad en orientaciones próximas al Norte.

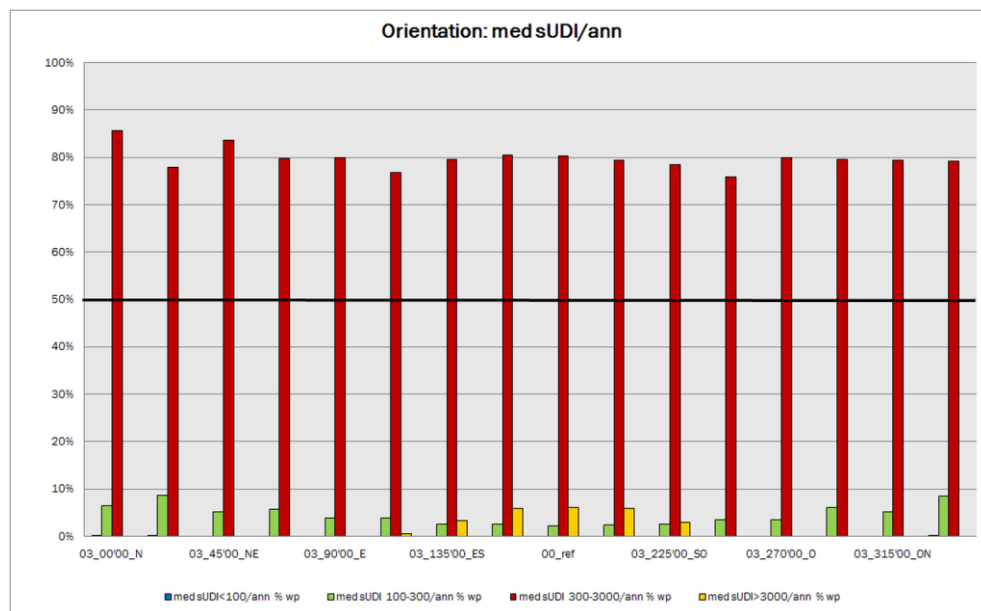


Figura 290: Orientación. mediana anual sUDI. P.M. Esquivias

Sin embargo, atendiendo a la *Iluminancia Natural Útil Simultánea (sUDI)*, se observa que aparecen zonas del plano de trabajo con iluminancia mayor de 3000 lux principalmente desde la orientación Sureste (03\_135'00\_ES) a la Suroeste (03\_225'00\_SO), modelos en los que  $SHGe > 45\%$ . En este rango se obtienen los mayores valores centrales anuales de porcentaje del plano de trabajo con iluminancia entre 500 y 3000 lux, luego adecuado para el desarrollo de tareas visuales de alta precisión, siendo el rango donde se obtienen los valores mínimos de zonas con iluminancias entre 100 y 500 lux.

Por otro lado, los modelos correspondientes a las orientaciones Este, Estesudeste, Oeste Suroeste y Oeste (90°, 112'50°, 247'50° y 270°) presentan valores centrales anuales de porcentaje

del plano de trabajo con iluminancia entre 500 y 3000 lux entre 45 y 50% sin presencia de zonas con un nivel de iluminación mayor de 3000 lux ni menor de 100 lux. En estos modelos  $sUDI_{300-500}$  está entre el 10-20% y  $sUDI_{100-300}$  es aproximadamente 3'5%.

Por último, las orientaciones comprendidas entre el Oeste Noroeste y el Estenordeste presentan un  $sUDI_{500-3000} < 40\%$  y se distinguen dos grupos. Las orientaciones próximas al Norte ( $337'50^\circ$  a  $22'50^\circ$ ) tienen un  $sUDI_{100-300} > 7\%$ ,  $sUDI_{300-500} > 30\%$  y  $sUDI_{<100} = 0'18\%$  mientras las más cercanas al Este y el Oeste ( $45^\circ$ ,  $67'50^\circ$ ,  $292'50^\circ$  y  $315^\circ$ ) no tienen zonas con iluminancia menor de 100 lux, siendo  $sUDI_{100-300} = 5'5\%$ ,  $sUDI_{300-500} = 26'50\%$ . En este último grupo se equiparan  $sUDI_{300-500}$  y  $sUDI_{500-3000}$  sin presencia de zonas con iluminancia excesiva ni demasiado baja, siendo mínima la porción entre 100 y 300 lux por lo que estas orientaciones serían adecuadas para el desarrollo de tareas visuales de media y alta precisión.

La relación proporcional de los diferentes modelos respecto al modelo de referencia se muestra en la Tabla 67 y en la Figura 291 y Figura 292. Como el indicador  $sUDI_{<100}$  en el modelo de referencia es 0%, éste no se incluye en el cálculo de la relación proporcional.

Se observa que, de entre todos los indicadores, el efecto de la orientación afecta sobre todo al indicador de *Insolación excesiva*, pudiendo reducir los valores hasta casi anular el valor obtenido para el modelo de referencia. En mucha menor medida también se ve afectado el indicador  $DSg$ , pudiendo reducir hasta un 20% el valor del modelo de referencia.

Tal como se esperaba, debido a la utilización del *Cielo Nublado Estándar CIE* para la obtención de la contribución difusa de la iluminación natural, el indicador  $DSd$  se mantiene constante para cualquier orientación, en coherencia con el *Factor de Iluminación Natural*.

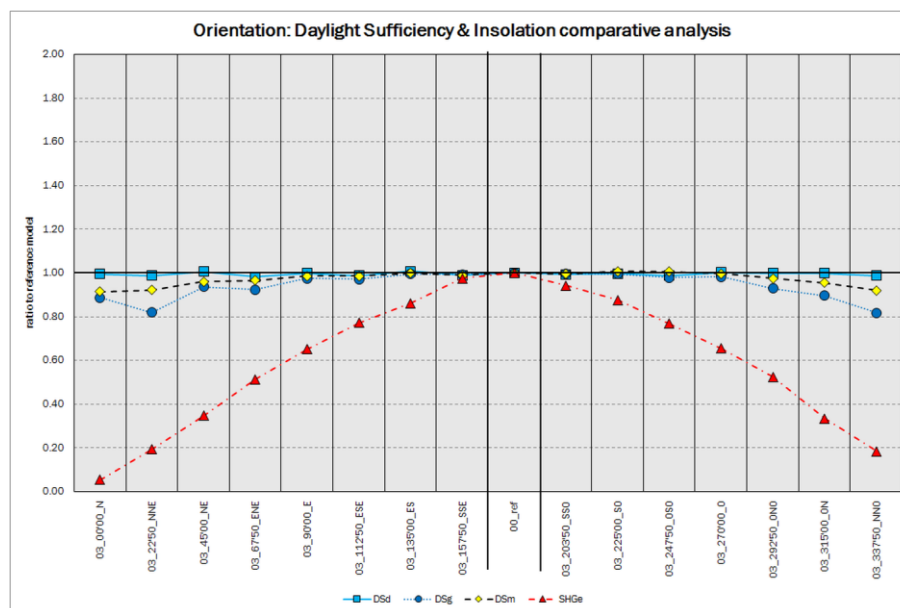


Figura 291: Variación de los indicadores  $DSg$ ,  $DSd$ ,  $DSm$  y  $SHGe$  respecto al modelo de referencia debido a la orientación. P.M. Esquivias

En relación a la obtención de diferentes rangos de iluminancia de forma simultánea en el plano de trabajo, se observa que a medida que la orientación de la fachada acristalada se mueve del Sur al Norte se producen comportamientos diferentes.

Se observa que la región del plano de trabajo con iluminancia entre 100 y 500 lux es la que se ve más afectada por el cambio de la orientación del modelo de referencia, produciéndose incrementos de hasta cerca de 4 veces los valores del modelo de referencia, orientado al Sur.



La porción del plano de trabajo con una iluminancia entre 500 y 3000 lux se reduce casi hasta la mitad en los modelos con orientaciones opuestas al modelo de referencia y  $sUDI_{>3000}$  también presenta factores de proporcionalidad menores de la unidad.

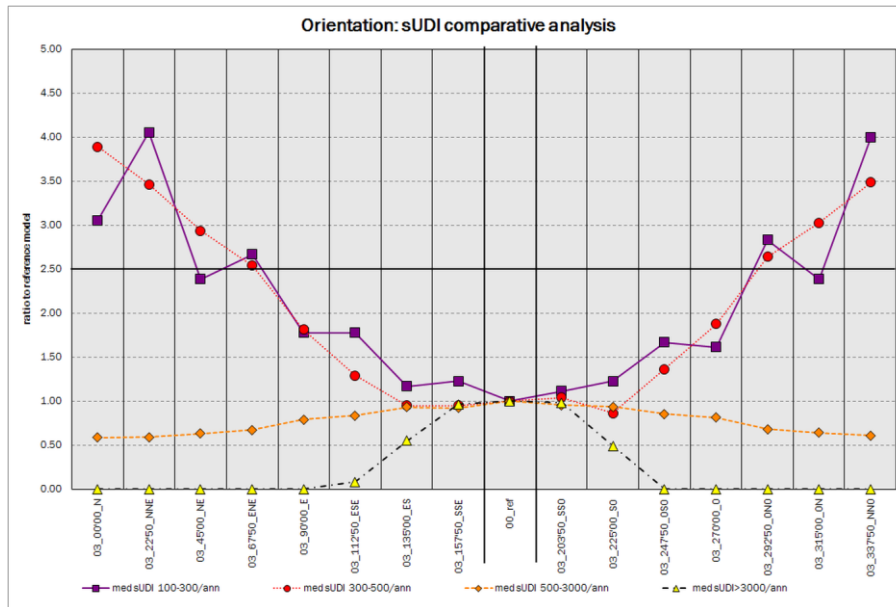


Figura 292: Variación del conjunto de indicadores  $sUDI$  respecto al modelo de referencia debido a la orientación.  
P.M. Esquivias

Se podría afirmar que a medida que la orientación cambia, se reduce la intensidad de la iluminación, por lo que se reduce el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia mayor de 500 lux a favor del rango entre 100 y 500 lux. También se observa a partir de las gráficas la simetría de los resultados anuales.

	$sUDI/med/ann$				Daylight Sufficiency			$SHGe$
	100-300	300-500	500-3000	>3000	$DSd$	$DSg$	$DSm$	
03_00'00_N	3.06	3.89	0.59	0.00	0.99	0.89	0.91	0.05
03_22'50_NNE	4.06	3.46	0.59	0.00	0.99	0.82	0.92	0.19
03_45'00_NE	2.39	2.94	0.63	0.00	1.00	0.94	0.96	0.34
03_67'50_ENE	2.67	2.54	0.67	0.00	0.98	0.92	0.97	0.51
03_90'00_E	1.78	1.81	0.79	0.00	1.00	0.97	0.98	0.65
03_112'50_ESE	1.78	1.29	0.84	0.08	0.99	0.97	0.98	0.77
03_135'00_ES	1.17	0.95	0.93	0.55	1.01	0.99	1.00	0.86
03_157'50_SSE	1.22	0.95	0.92	0.96	0.99	0.99	0.99	0.97
00_ref	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
03_203'50_SSO	1.11	1.04	0.96	0.98	0.99	1.00	0.99	0.94
03_225'00_SO	1.22	0.86	0.94	0.49	1.00	0.99	1.01	0.87
03_247'50_OSO	1.67	1.36	0.85	0.00	0.99	0.98	1.00	0.77
03_270'00_O	1.61	1.88	0.81	0.00	1.00	0.98	1.00	0.65
03_292'50_ONO	2.83	2.64	0.68	0.00	1.00	0.93	0.97	0.52
03_315'00_ON	2.39	3.03	0.64	0.00	1.00	0.90	0.95	0.33
03_337'50_NNO	4.00	3.49	0.61	0.00	0.99	0.82	0.92	0.18

Tabla 67: Serie 3: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia

El modelo de referencia, cuya fachada acristalada tiene orientación Sur, presenta los máximos valores de  $sUDI_{500-3000}$ ,  $sUDI_{>3000}$ ,  $DSg$  y  $SHGe$ , que se reducen en los demás modelos de la serie hasta alcanzar los mínimos alrededor de la orientación Norte. El comportamiento contrario se presenta en los indicadores  $sUDI_{100-300}$  y  $sUDI_{300-500}$ .

Respecto a la evolución mensual del indicador de Suficiencia global [Figura 293] y de las Iluminancias Útiles [Figura 295] [Figura 296] entre 300 y 3000 lux y del indicador de insolación [Figura 294], y debido a la simetría de comportamientos, se toman los modelos desde el Norte al Sur pasando por el Este.

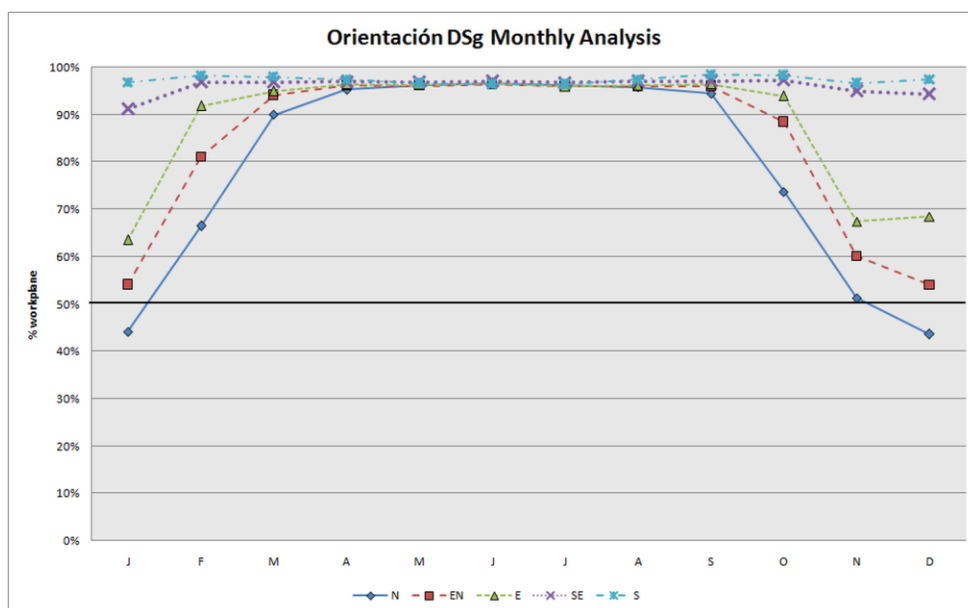


Figura 293: Valores mensuales de *DSg* según la orientación. P.M. Esquivias

Se observa cómo para la orientación Sur la curva *DSg* es prácticamente llana y a medida que se gira hacia el Norte descenden los valores desde el equinoccio de Otoño al equinoccio de Primavera, periodo en el que se producen las mayores diferencias entre las curvas. Sin embargo, durante el semestre cálido, las curvas prácticamente se superponen. Sólo en el caso de la orientación Norte se encuentran meses en los que no se alcanza el objetivo de 50% *DSg*.

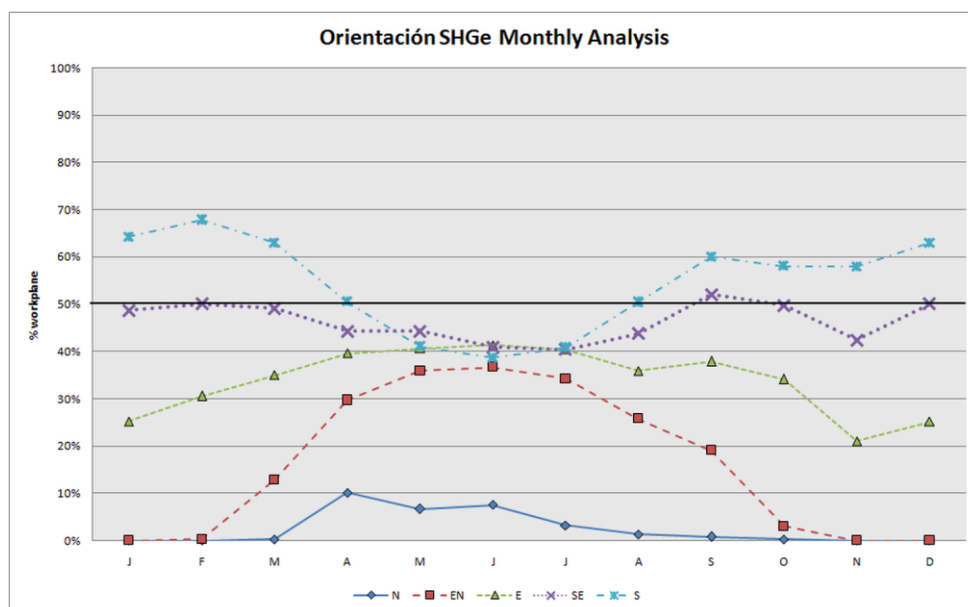


Figura 294: Valores mensuales de *SHGe* según la orientación. P.M. Esquivias

En lo relativo a la *Insolación Excesiva*, se distinguen dos grupos de curvas. Por un lado se encuentra la curva de la orientación Norte, con un *SHGe* máximo del 10% de las horas diurnas; y por otro las demás curvas, que se distribuyen como un haz en torno al solsticio de verano. Es decir, todas las curvas confluyen en Junio, con una diferencia del 5% entre ellas, sin embargo, a medida

que se acercan al solsticio de invierno aumenta la diferencia entre ellas, describiendo todas ellas curvas parabólicas, ya sean crecientes o decrecientes.

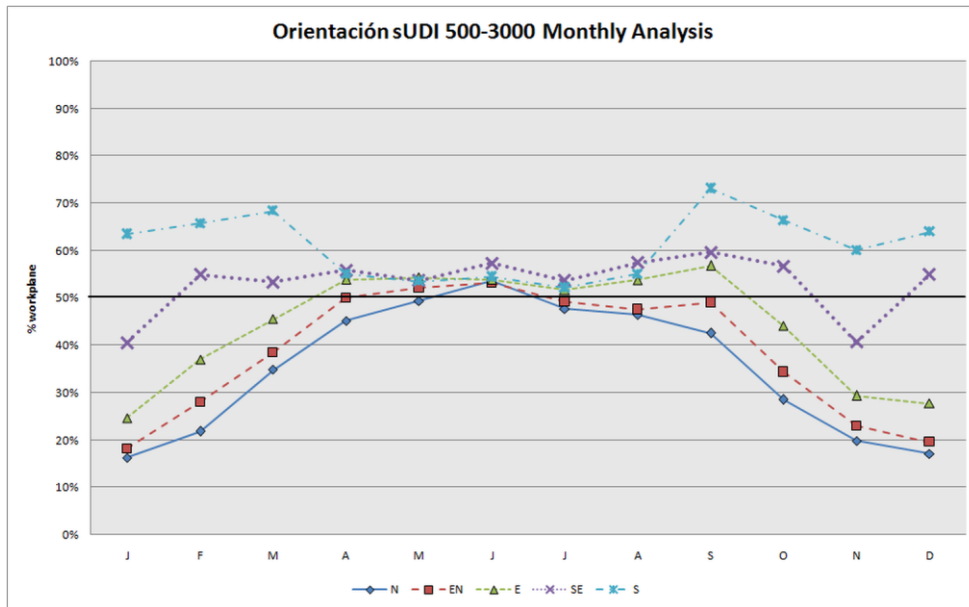


Figura 295: Valores mensuales de sUDI500-3000 según la orientación. P.M. Esquivias

Aunque los valores anuales presentan el rango de iluminancias entre 500 y 3000 como de los de mayor variación respecto al modelo de referencia, se observa en la evolución mensual del indicador que prácticamente todas las curvas presentan el mismo comportamiento parabólico, salvo la curva del orientación Sur.

De hecho, las mayores diferencias se encuentran en el semestre frío, principalmente entre el modelo de referencia y las curvas correspondientes a las orientaciones Sureste y Este, ya que las curvas de las orientaciones Nordeste y Norte son similares a la de la orientación Este.

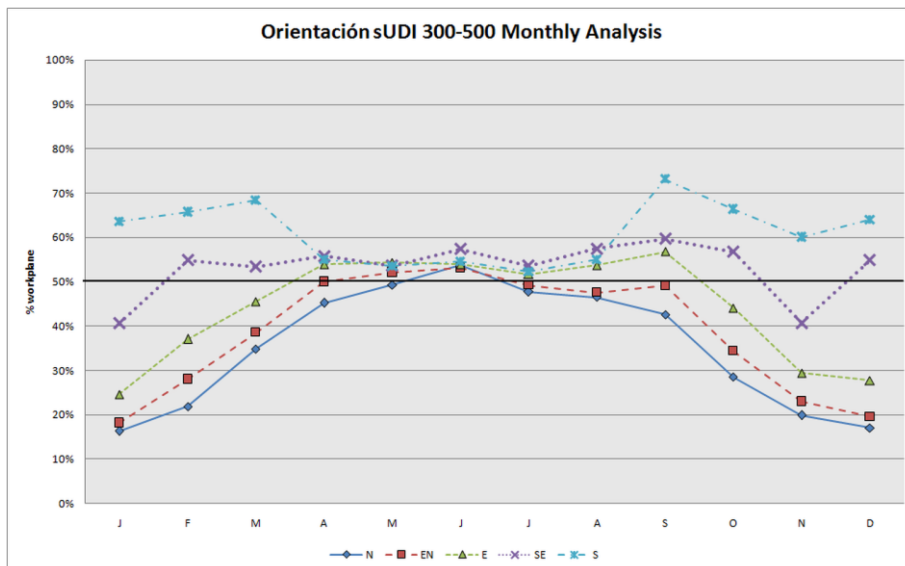


Figura 296: Valores mensuales de sUDI300-500 según la orientación. P.M. Esquivias

En cuanto al otro rango de mayor variación se observan tres grupos de curvas: el primer grupo lo componen las orientaciones Sur y Sureste, con forma acampanada, el segundo las orientaciones Este y Nordeste, con un comportamiento cosenoidal, y por último la orientación Norte, con un comportamiento más parabólico, presentando los máximos valores en casi todos los meses.

A la vista de las diferentes gráficas, se puede decir que los resultados coinciden tanto con el conocimiento experimental sobre la variación de las condiciones de iluminación natural e insolación de los espacios con la orientación como con las conclusiones del estudio de *Bodart y De Herde* [10], ya que, en las orientaciones Norte, Nornordeste y Nornoroeste se alcanzan los menores valores de todos los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural* así como el mayor porcentaje del plano de trabajo con iluminancia menor de 300 lux, por lo que su dependencia energética es mayor, ya sea térmica como lumínica. Mientras que las orientaciones próximas al Sur presentan el mayor valor de todos los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural* y el mayor porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia mayor de 300 lux, disminuyendo así su dependencia energética.

Los resultados también concuerdan con los de *S. Cammarano et al.* [16], *Shen y Tzempelikos* [278] y *Dubois y Flodberg* [302], al señalar que la orientación Sur es la que tiene el mayor potencial de *Autonomía de Luz Natural* aunque también tiene el mayor riesgo de deslumbramiento. Así también se muestra cómo las orientaciones Este y Oeste presentan un comportamiento similar, obteniendo valores intermedios a los obtenidos para las orientaciones Norte y Sur.

Sin embargo, es en los resultados de los modelos individuales, tal como se muestran en las «fichas de análisis-síntesis» [Anexo B], donde se observa la variación en el horario de dicha exposición solar. Dicha variación influye en el horario en que se obtiene la cobertura del plano de trabajo entre 300 y 3000 lux tal como muestran los mapas temporales individuales y tiene una fuerte relación con las *ganancias solares a través de las ventanas*, aunque dicha relación debe estudiarse más en profundidad para obtener resultados concluyentes.

Partiendo de que los mapas de falso color de *Factor de Iluminación Natural*, *Horas de Soleamiento* y *Radiación Solar Incidente* representan la componente difusa, directa y global de la radiación solar, se observa que las isolíneas de *Radiación Solar Incidente* tienen cierta similitud con las isolíneas de *Factor de Iluminación Natural* con influencia variable, en función de la orientación, de las isolíneas de las *Horas de Soleamiento*, evidenciando la diferencia en la intensidad de la radiación solar directa que entra a través del hueco.

## 4.4 El proyecto arquitectónico

---

El proyecto arquitectónico determina el *potencial de iluminación natural* de cada una de las zonas o espacios del edificio [71]. La Arquitectura es la que conforma el ambiente luminoso [4]. La configuración, las necesidades del programa y las características del proyecto arquitectónico pueden dar lugar a recurrir a diferentes recursos de diseño o sistemas de iluminación natural que forman parte de la envolvente del edificio. La envolvente del edificio es el elemento que permite la entrada de luz natural a los espacios interiores a través de la apertura de huecos, así como el control de la cantidad de la misma a través de la incorporación de protecciones solares.

La envolvente del edificio tiene la función de regular la relación entre las condiciones exteriores y las interiores. Considerando la iluminación natural, son los huecos ubicados en la envolvente los elementos de admisión de luz natural permitiendo la entrada de la misma en los espacios, sin olvidar que la equivalente a la incidencia directa de luz natural es una carga térmica conocida como ganancia solar.

La reducción del espesor de las paredes exteriores y el aumento de la superficie de ventana en las fachadas en la arquitectura moderna hace que sea más difícil el diseño de unas buenas condiciones de iluminación natural, siendo necesaria la utilización de elementos de control, es decir, elementos de protección solar, no sólo para evitar el sobrecalentamiento de los espacios interiores sino también para controlar el nivel de iluminación interior y evitar que se produzcan problemas de deslumbramiento [9].



#### 4.4.1 Elementos de admisión de luz natural: los huecos

El diseño de los huecos, de las ventanas y lucernarios, para admitir luz natural en un espacio, implica la determinación de multitud de variables. La mayoría de ellas actualmente es más fruto de intuiciones y de decisiones subjetivas del arquitecto que de una reflexión y una decisión con base objetiva sobre cómo van a afectar a las condiciones ambientales interiores.

Otros factores, como el tamaño de los huecos y su transmitancia (térmica) sí se han comenzado a tener en cuenta en el proyecto arquitectónico, especialmente desde la aprobación en 2006 del *Código técnico de la Edificación* [241], donde se contemplaba el cumplimiento del *Documento Básico de Limitación de Demanda Energética* a través de un procedimiento prescriptivo basado en la obtención de un valor del parámetro característico menor que los valores límites y máximos marcados por la norma.

En este contexto, el tamaño y las características térmicas de los huecos juegan un papel fundamental a la hora de determinar dichos parámetros. Sin embargo, con la actualización del *Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación* [137] en 2013, sólo se permite el método prestacional, donde se da una mayor libertad a la hora de elegir el tamaño y el producto de ventana para cumplir con los requisitos marcados en la normativa.





#### 4.4.1.1 Tamaño del hueco

El tamaño de ventana afecta a diversas cuestiones geométricas. En primer lugar, al modificar la superficie de la ventana, los ratios entre dicha superficie y la superficie del suelo o el volumen del espacio también se van a ver modificados. Por otro lado, al variar el tamaño, también se modifica la altura del alféizar y la altura de la ventana, así como su distancia a las paredes perpendiculares a la fachada.

Manteniendo como constantes en esta serie, el tamaño del espacio, la forma de la ventana como cuadrada (ancho = alto), así como su posición central en la fachada (misma distancia a los cuatro paramentos que delimitan la fachada) y una sola ventana conteniendo toda la superficie, se definen los siguientes valores [Tabla 68] que dar lugar a la creación de los modelos de cálculo [Figura 297]:

Nº	WWR	Sup (m <sup>2</sup> )	Alto/Ancho	Distancia (m)	WFR	WVR
1	5%	0.45	0.671	1.16	5%	1.67%
2	10%	0.90	0.950	1.03	10%	3.34%
3	20%	1.80	1.342	0.83	20%	6.67%
4	30%	2.70	1.644	0.68	30%	10.00%
5	40%	3.60	1.898	0.55	40%	13.34%
6	50%	4.50	2.121	0.44	50%	16.67%
7	60%	5.40	2.324	0.34	60%	20.00%
8	70%	6.30	2.510	0.25	70%	23.33%
9	80%	7.20	2.684	0.16	80%	26.67%
10	90%	8.10	2.864	0.08	90%	30.00%
11	100%	9.00	3.000	0.00	100%	33.33%

Tabla 68: Valores de Superficie de ventana y sus variables dependientes.

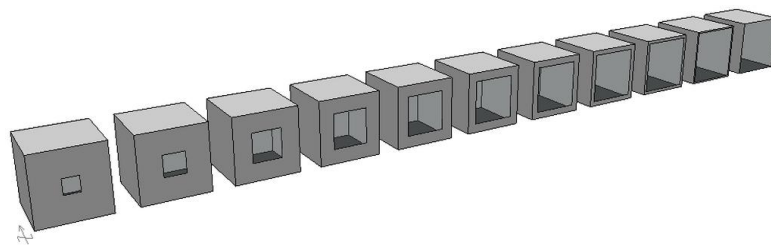


Figura 297: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie "Superficie de ventana" en Ecotect. De izquierda a derecha: WWR de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 %. P.M. Esquivias

El impacto de la modificación de la *Superficie relativa de la ventana respecto a la pared (Window-to-wall ratio -WWR)*, en cada uno de los indicadores se muestra en la Figura 298 y en la Tabla 69.

Se observa que a medida que aumenta la superficie de hueco los indicadores *Suficiencia de Iluminación Natural global, difusa, mantenida e insolación excesiva (DSg, DSd, DSm y SHGe)* presentan un crecimiento logarítmico. Estos indicadores se dividen en dos grupos, coincidiendo en unidad de medida: los que se miden en porcentaje de plano de trabajo, *DSg* y *DSd*, cuyo límite es el 100% del mismo, y los que se miden en porcentaje de horas diurnas, *DSm* y *SHGe*, cuyo límite es el 88'50% de las mismas.

Siendo el modelo 04\_100 representativo de la máxima superficie de hueco que se puede tener en una fachada, los valores obtenidos para este modelo corresponden con la máxima captación de

luz natural e insolación del modelo espacial tomado de referencia. Asimismo, la consecución en la serie de valores constantes representa el valor de saturación de determinado indicador.

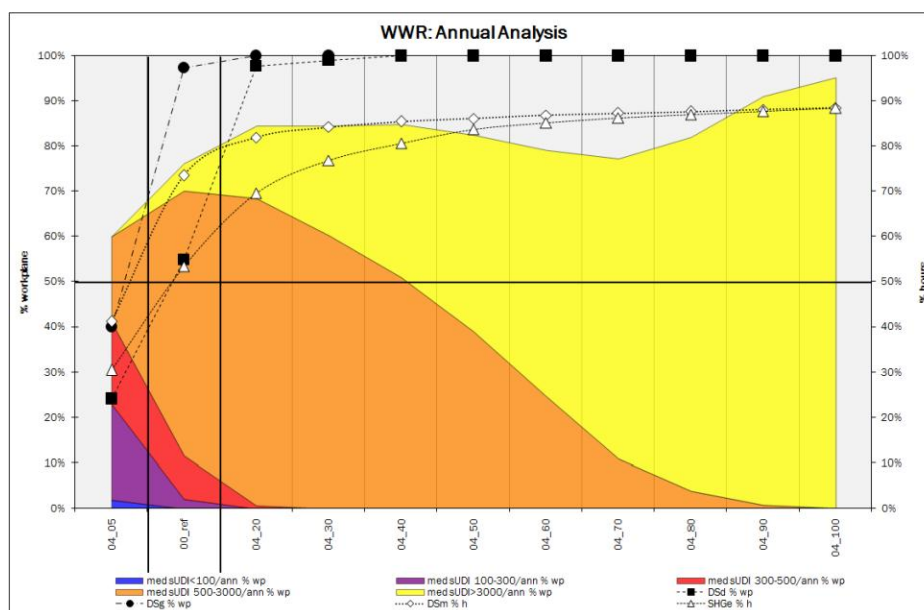


Figura 298: Serie 4: Tamaño del hueco. Indicadores anuales. P.M. Esquivias

Al reducir la superficie de hueco del modelo de referencia se elimina el porcentaje del plano de trabajo sobreiluminado y la superficie del mismo alcanza equitativamente iluminancias comprendidas entre 100 y 3000 lux, pero no se consiguen las condiciones de iluminación natural mínimas para considerar el espacio suficientemente iluminado naturalmente. Por tanto, esta opción de diseño arquitectónico deberá estudiarse cuidadosamente en los casos concretos.

Tal como afirmaba *Büllow-Hübe* [306], a medida que aumenta la superficie de ventana, aumenta la contribución difusa pero no en proporción directa a la superficie acristalada, alcanzando la máxima *DSd* en el modelo con una relación del 40% (04\_40) mientras la máxima *DSg* se alcanza en el modelo cuya relación de superficies es del 20% (04\_20).

Se observa también, a través de los resultados, que a partir de una superficie de hueco igual al 20% de la superficie de fachada todo el plano de trabajo alcanza 300 lux simultáneamente durante el 50% de las horas diurnas del año debido tanto a la componente directa como difusa de la luz natural. El valor de saturación de ambas contribuciones indica que se alcanzarán simultáneamente 300 lux durante un porcentaje mayor de horas diurnas.

A partir del modelo con el 60% de la fachada acristalada (04\_60) la diferencia con el límite superior de horas (88'50%-3876'3 horas, 10'62 horas diarias) es relativamente insignificante. Este hecho concuerda con las conclusiones de *Büllow-Hübe* [306] que afirma que una fachada totalmente acristalada no proporciona una significativa mayor iluminación natural que con una superficie del 60%WWR.

Del mismo modo, *DSm* indica que en dicho porcentaje temporal se alcanzan 300 lux en el 50% del plano de trabajo por lo que la consecución de altos valores en diferentes modelos de la serie indica que se obtendrán 300 lux simultáneamente en un mayor porcentaje del plano de trabajo.

Si bien los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural* marcan un límite de iluminancia en el plano de trabajo, los indicadores de *Iluminancia Natural Útil simultánea (sUDI)* representan la obtención de un rango de niveles de iluminación natural.

Considerando la iluminancia natural útil simultánea suficiente, es decir, el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 3000 lux, se observa que sólo se alcanza el *criterio de iluminación natural suficiente* para una superficie de hueco comprendida entre el 10 y el 40%.

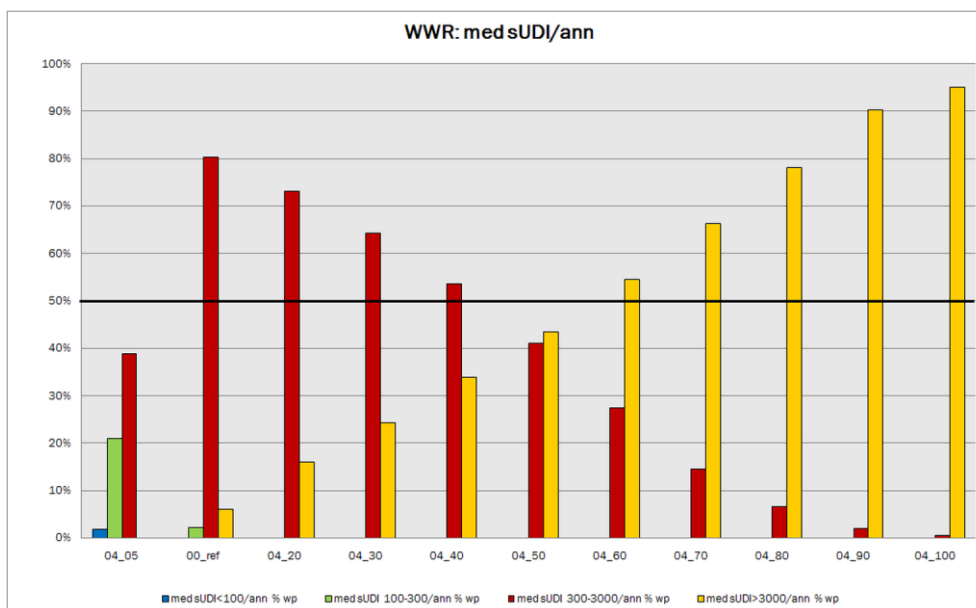


Figura 299: Superficie de la ventana. mediana anual sUDI. P.M. Esquivias

Para una superficie de hueco mayor del 40% la iluminancia que se obtiene en el plano de trabajo principalmente excede los 3000 lux, representando, por tanto, una gran probabilidad de aparición de situaciones de deslumbramiento.

Así también, considerando el límite de 10% propuesto por la *IESNA* [126] para la *exposición solar anual*, relacionada en cierta forma con el indicador  $sUDI_{>3000}$ , la mayoría de los modelos estudiados sobrepasarían este valor.

	sUDI med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	DSd	DSg	DSm	SHGe
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
04_05	1.90%	21.05%	18.19%	18.91%	0.00%	24.14%	40.07%	41.21%	30.51%
00_ref	0.00%	2.14%	9.51%	58.50%	6.06%	54.93%	97.38%	73.48%	53.43%
04_20	0.00%	0.00%	0.71%	67.78%	16.05%	97.74%	100.00%	81.98%	69.55%
04_30	0.00%	0.00%	0.00%	60.29%	24.26%	99.05%	100.00%	84.26%	76.90%
04_40	0.00%	0.00%	0.00%	51.01%	33.89%	100.00%	100.00%	85.50%	80.61%
04_50	0.00%	0.00%	0.00%	39.00%	43.52%	100.00%	100.00%	86.16%	83.75%
04_60	0.00%	0.00%	0.00%	24.73%	54.46%	100.00%	100.00%	86.82%	85.16%
04_70	0.00%	0.00%	0.00%	10.94%	66.35%	100.00%	100.00%	87.27%	86.33%
04_80	0.00%	0.00%	0.00%	3.92%	78.12%	100.00%	100.00%	87.66%	87.06%
04_90	0.00%	0.00%	0.00%	0.83%	90.25%	100.00%	100.00%	88.08%	87.76%
04_100	0.00%	0.00%	0.00%	0.12%	95.12%	100.00%	100.00%	88.51%	88.47%

Tabla 69: Serie 4: Tamaño de hueco. Indicadores anuales

En este sentido se observa que a partir del modelo 04\_20, durante el 50% de las horas diurnas, el nivel de iluminación que alcanza el plano de trabajo es superior a 500 lux, incrementándose especialmente el área del plano de trabajo con excesiva iluminación, por tanto con alta probabilidad de causar deslumbramiento en los ocupantes, llegando a ocupar casi la totalidad de la superficie del espacio.

Es por ello que *Bülow-Hübe* [306] afirma que la aparición de problemas de deslumbramiento a medida que aumenta la superficie de ventana provoca una mayor utilización de los elementos de protección solar, consiguiendo finalmente los mismos niveles de iluminación natural que si se hubiera optado por una fachada más convencional. Este hecho se correlaciona con lo afirmado por *Poirazis* [317]: a medida que aumentan la superficie de ventana, aumento el consumo energético total del edificio. Esto puede deberse al sobrecalentamiento y al empleo de dispositivos de oscurecimiento utilizando de forma continua la iluminación artificial (*Bodart y De Herde* [10]).

En el caso individual de una menor superficie de ventana, abunda el porcentaje del plano de trabajo con una iluminación menor de 300 lux, conllevando también un mayor consumo energético. Además, tal como se señala en el Estado del Arte, aparecerían situaciones de deslumbramiento, no por exceso de iluminación, sino por la presencia de una superficie pequeña en el campo visual con una alta luminancia [4]. Este hecho debería contrastarse con otros estudios complementarios relativos a los índices de deslumbramiento en relación con la percepción del usuario.

En casi todos los modelos, la aportación a alcanzar iluminancias entre 100 y 300 lux es prácticamente nula, comportamiento que se extiende a iluminancias menores de 100 lux. Al ser valores medianos, se puede afirmar, a la vista de los resultados, que durante el 50% de las horas diurnas anuales no es necesaria la iluminación artificial ni suplementaria ni complementaria.

El máximo de  $sUDI_{500-3000}$  se alcanza en el modelo 04\_20 y se ve superado por  $sUDI_{>3000}$  con una superficie de hueco del 50% de la superficie de fachada. De hecho, a partir del modelo 04\_20 se obtiene una SHGe mayor del 70% provocando un  $sUDI_{>3000}$  mayor del 20%, por lo que será necesaria la incorporación de dispositivos de protección solar para evitar tanto el sobrecalentamiento del espacio como la aparición de deslumbramiento. Este hecho ya lo señalaba *Bülow-Hübe* [306] en sus resultados.

En general se observa y se confirma que las grandes superficies acristaladas no implican una mejor iluminación natural, así como tampoco implica necesariamente una reducción del consumo energético del edificio [306] [305] [307] [309] [314] [317] [318] [320].

De hecho, *Thalfeldt* [307] señala que la superficie mínima de ventana debe estar entre el 21% y el 29'5%, aunque es cierto que su estudio se basa sólo en la contribución difusa de la luz natural, por lo que sus resultados corresponden con los obtenidos en esta investigación. Considerando además la orientación, finalmente recomienda una superficie del 25% para las fachadas Sur, Este y Oeste y del 40% para la fachada Norte. En línea con estas conclusiones se encuentran los resultados de *Dubois y Flodberg* [302], que recomiendan superficies entre el 20% y el 40% dependiendo de la orientación. Sin embargo, tanto *Tzempelikos y Athienitis* [320] como *Shen y Tzempelikos* [278] recomiendan una superficie relativa del 30% para todas las orientaciones ya que satisface los requisitos de iluminación natural en balance con las cargas térmicas y el consumo de iluminación artificial.

Mientras existe una cierta coherencia con estos autores, *Ochoa* [309] propone superficies de ventana superiores que pueden corresponder con los valores propuestos si se aplican los factores de minoración obtenidos para la serie relativa a las Condiciones climáticas.

En contraste con estos resultados se encuentran las recomendaciones normativas, basadas en la contribución difusa de la iluminación natural, que recomiendan superficies de ventana entre el 5% y el 16%, valores que se demuestran ser insuficientes para alcanzar los requisitos de iluminación natural actuales.

Parece, por tanto, y en coherencia entre los resultados de esta investigación y los proporcionados por diversos autores, que la superficie de ventana debe estar entre el 10%, si se

fundamenta en la contribución global, y el 40%, si se fundamenta en la contribución difusa, cuestión que, tal como se ha visto anteriormente, depende de la orientación del edificio, las condiciones climáticas y las obstrucciones del entorno. En cualquier caso, habrá que tener una especial atención a las ganancias solares y proponer medidas que las reduzcan.

Los factores de proporcionalidad respecto al modelo de referencia que se muestran en la Tabla 70 y en la Figura 300 donde se observa el fuerte crecimiento lineal de  $sUDI_{>3000}$  y el descenso de los demás indicadores salvo un ligero ascenso de  $sUDI_{500-3000}$ . También se observa que en el modelo 04\_05 se duplica el área del plano de trabajo con un rango de iluminancias entre 300-500 lux, siendo hasta 10 veces la porción con nivel de iluminación adecuado para el desarrollo de tareas visuales de baja precisión. Como el indicador  $sUDI_{<100}$  en el modelo de referencia es 0%, éste no se incluye en el cálculo de la relación proporcional.

	$sUDI$ med/ann				Daylight Sufficiency			$SHGe$
	100-300	300-500	500-3000	>3000	$DSd$	$DSg$	$DSm$	
04_05	9.84	1.91	0.32	0.00	0.44	0.41	0.56	0.57
00_ref	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
04_20	0.00	0.07	1.16	2.65	1.78	1.03	1.12	1.30
04_30	0.00	0.00	1.03	4.00	1.80	1.03	1.15	1.44
04_40	0.00	0.00	0.87	5.59	1.82	1.03	1.16	1.51
04_50	0.00	0.00	0.67	7.18	1.82	1.03	1.17	1.57
04_60	0.00	0.00	0.42	8.99	1.82	1.03	1.18	1.59
04_70	0.00	0.00	0.19	10.95	1.82	1.03	1.19	1.62
04_80	0.00	0.00	0.07	12.89	1.82	1.03	1.19	1.63
04_90	0.00	0.00	0.01	14.89	1.82	1.03	1.20	1.64
04_100	0.00	0.00	0.00	15.70	1.82	1.03	1.20	1.66

Tabla 70: Serie 4: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia

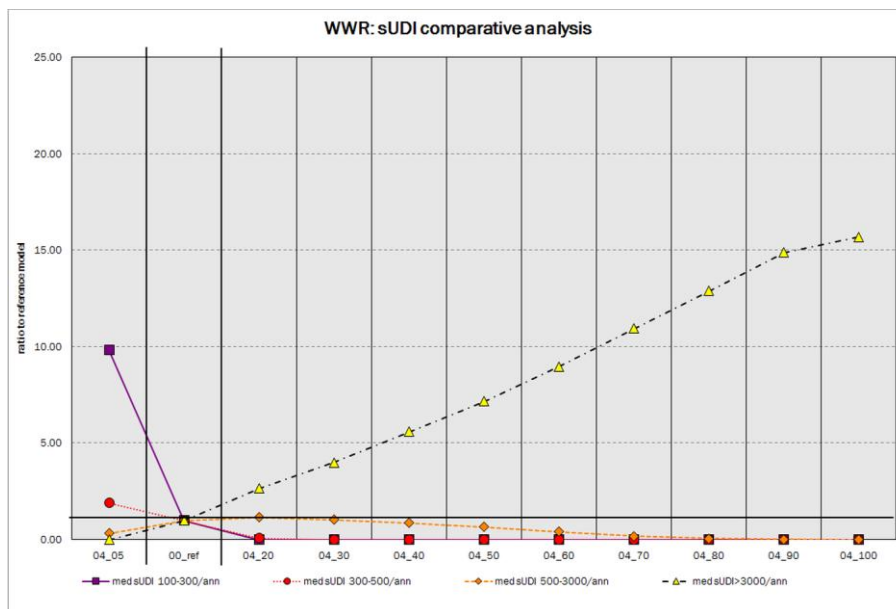


Figura 300: Variación del conjunto de indicadores  $sUDI$  respecto al modelo de referencia debido al tamaño del hueco. P.M. Esquivias

Tal como se observa en los resultados de la tabla, la modificación de la superficie de la ventana tiene un gran impacto en el porcentaje que supera los 3000 lux, aumentando, por tanto, la probabilidad de aparición de situaciones de deslumbramiento. También tiene un gran impacto en el

porcentaje del plano que alcanza una iluminancia simultánea entre 500 y 3000 lux, siendo menos relevante en los otros rangos.

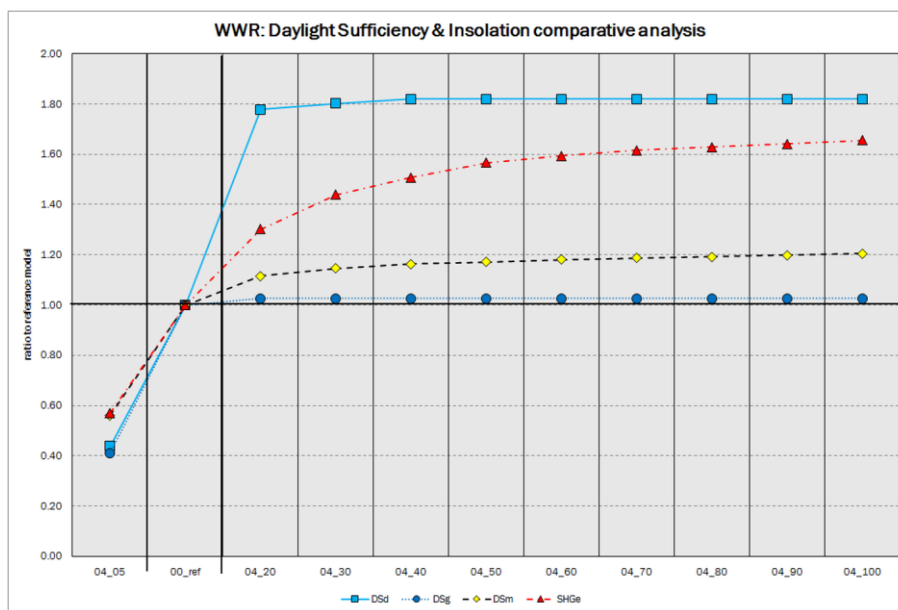


Figura 301: Variación del conjunto de indicadores *DSg*, *DSd*, *DSm* y *SHGe* respecto al modelo de referencia debido al tamaño del hueco. P.M. Esquivias

En la Figura 301 se puede observar cómo frente a un primer gran impacto de los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural* y de *Insolación Excesiva* debido a la variación de la superficie de hueco del 5 al 20% de la superficie de fachada, los valores se estabilizan, apenas siendo modificados en superficies de hueco mayores, especialmente con los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural global y difusa*, los indicadores *DSd* y *SHGe*, sin embargo, presentan un comportamiento parabólico.

Para analizar la evolución mensual, se toman los indicadores: *Suficiencia de Iluminación Natural global*, *Insolación Excesiva* e *Iluminación Natural Útil simultánea* entre 500-3000 lux y mayor de 3000 lux. Además, debido a las variaciones y recomendaciones sólo se toman los modelos del 10 al 40% de superficie acristalada.

Al analizar y correlacionar *DSg* con *SHGe* [Figura 302] se observa, que apenas se producen variaciones en el indicador *DSg* mientras se aprecia un cierto movimiento mensual de *SHGe*.

Con respecto a este último indicador se observa que a medida que aumenta la superficie de la ventana, las curvas descriptivas se vuelven más planas, alcanzando valores mayores del 70%h de *insolación excesiva* en el espacio.

Mientras el modelo de 10% presenta una relativa reducción de *SHGe* durante los meses estivales, a partir de una superficie del 20% se observa un comportamiento relativamente constante durante todo el año, de mayor cuantía a medida que aumenta la superficie.

Se observa, además, que todos los porcentajes de superficie alcanzan el objetivo propuesto de 50% *DSg*.

Este comportamiento, en cierta forma está relacionado con el porcentaje en que se obtiene una iluminancia excesiva en el plano de trabajo [Figura 303]. Así como la mayor insolación se produce en los meses de invierno, la mayor aparición de iluminancias mayores de 3000 lux tiene lugar también durante los meses de invierno, descendiendo a medida que se aproxima al solsticio de

verano. Se observa también que, aunque con diferentes valores, las curvas de  $sUDI_{>3000}$  presentan un comportamiento similar, siendo las diferentes curvas prácticamente paralelas.

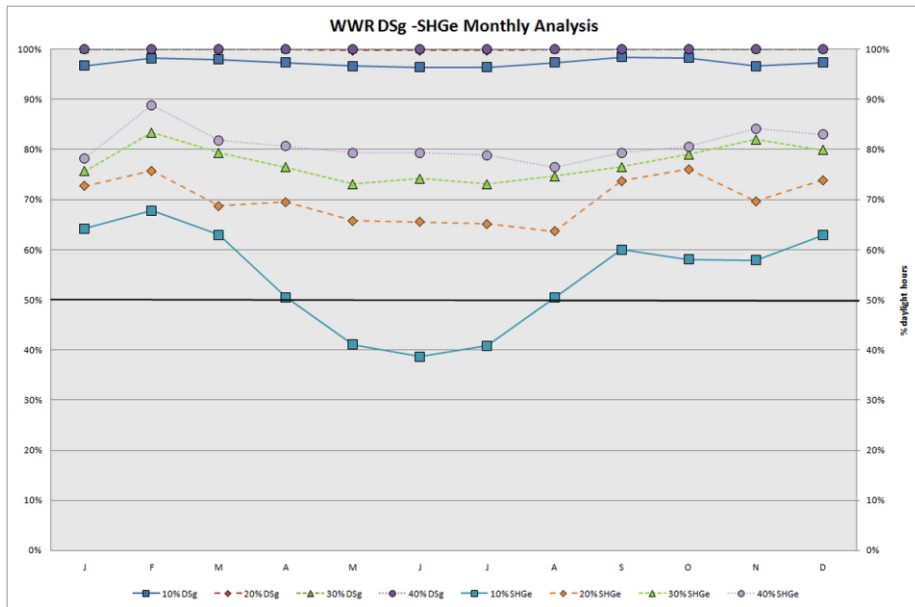


Figura 302: Dsg y SHGe mensual para una superficie relativa entre 10% y 40%

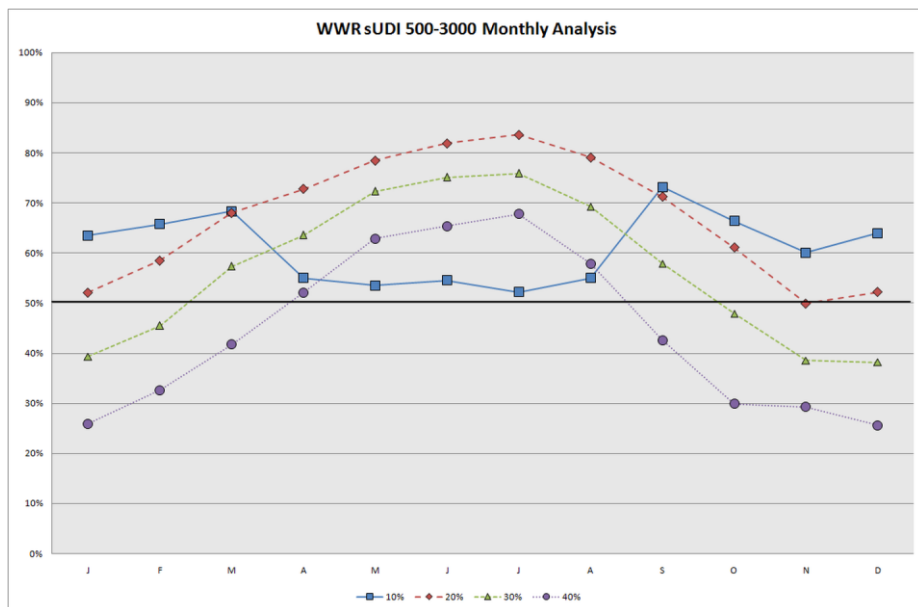


Figura 303: sUDI > 3000 mensual para una superficie entre el 10 y el 40%

Si se atiende al porcentaje en el que se alcanzan determinados rangos de iluminancia, se observa, en coherencia con los resultados anuales, que con un rango de superficie relativa entre el 20 y el 40%, la iluminación natural del espacio se basa en iluminancias mayores de 500 lux.

También se corrobora que, aunque con diferente cuantía, los modelos entre el 20% y 40% presentan comportamientos similares, siendo sus curvas descriptivas paralelas, mientras que el modelo de 10% presenta un comportamiento diferencial.

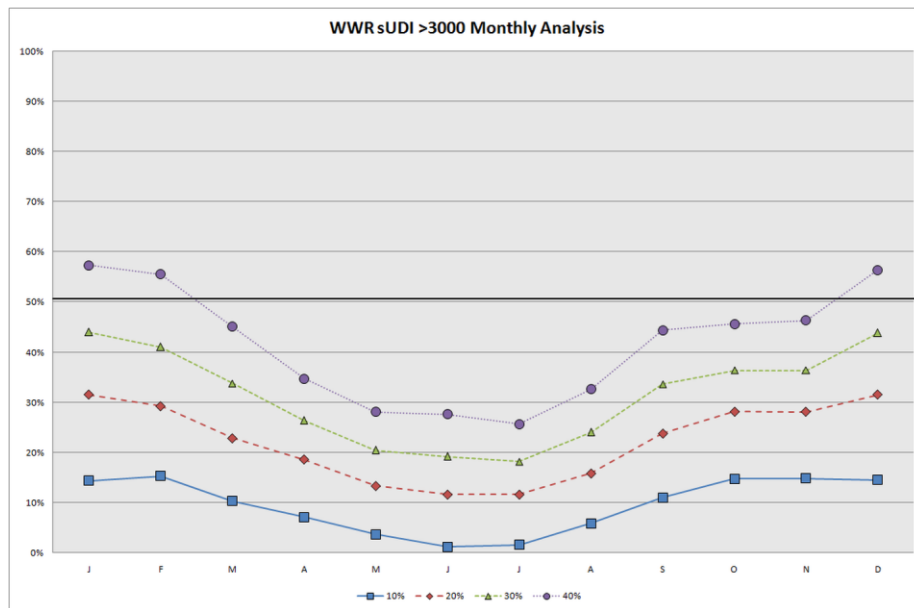


Figura 304: sUDI 500-3000 mensual para una superficie entre el 10 y el 40%

Atendiendo a las características individuales plasmadas en las «fichas de síntesis-análisis» se observa el mismo comportamiento que el expresado por *Büllow-Hübe* [306] que afirma que “*en las habitaciones iluminadas lateralmente, el nivel de iluminación es mayor cerca de la ventana y se reduce drásticamente a medida que se aleja de la misma, incluso cuando la fachada está completamente acristalada*”.

También se observa cómo el gradual incremento de la superficie de ventana afecta a una mayor aparición de situaciones de deslumbramiento y sobrecalentamiento del espacio durante un mayor porcentaje de horas, llegando a situaciones en las que se produce sobrecalentamiento durante todas las horas diurnas, por lo que se incrementaría el consumo energético tanto térmico como lumínico a medida que aumenta la superficie, tal como afirma *Poirazis* [317].



#### 4.4.1.2 Transparencia del hueco

Existe una gran diversidad de sistemas de acristalamientos en el mercado, desarrollados para fomentar o impedir la entrada de determinadas longitudes de onda de la *radiación solar incidente*, pertenecientes a diferentes rangos del espectro electromagnético.

La propiedad que determina la cantidad de radiación solar en rango visible que atraviesa el material es la *transmitancia visible* ( $t_{vis}$ ), cuyo rango de valores puede variar de 0% a 100%. En principio, el planteamiento era estudiar variaciones del 10%, siendo estos valores la estratificación ideal del estudio.

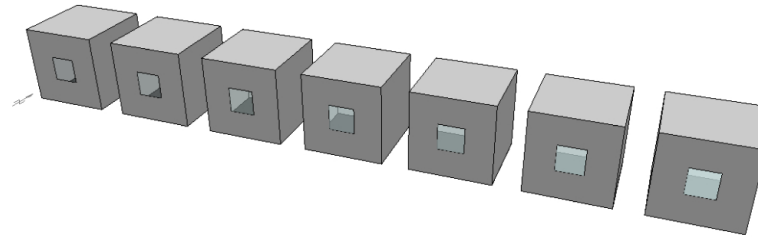


Figura 305: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie "Transparencia" en Ecotect. De izquierda a derecha:  $\tau_{vis}$  de aproximadamente 90, 80, 70, 60, 50, 40 y 30 %. P.M. Esquivias

El *Coefficiente de Ganancias Solares* caracteriza la transparencia del acristalamiento a la radiación solar directa. La *transmitancia térmica* es, actualmente, el parámetro relativo a la ventana que más se tiene en cuenta y del que se tiene mayor control y conocimiento. La Tabla 71 muestra las características de los productos de ventana seleccionados y la Figura 305 los modelos de cálculo.

Nº	Valor	Sistema de Acristalamiento	Transmitancia			
			Visible (VT)	Solar directa (ST)	Solar Total (SHGC)	Térmica (U - W/m <sup>2</sup> K)
1	90%	Generic Clear Glass 6 mm	0.884	0.771	0.817	5.810
2	80%	Double Clear with Argon	0.813	0.710	0.765	2.576
3	70%	Triple Clear	0.700	0.502	0.623	1.744
4	60%	View Glass 6 mm	0.586	0.395	0.465	1.892
5	50%	Triple Low-e Argon	0.514	0.222	0.318	0.700
6	40%	Sage blue	0.409	0.217	0.308	1.834
7	30%	Thermo chromic Gray	0.322	0.262	0.388	2.666

Tabla 71: Productos de ventana disponibles en el mercado, escogidos según su transmitancia visible.

El impacto de la modificación de las propiedades del vidrio que cubre el hueco sobre las condiciones anuales de iluminación natural e insolación se ve reflejado en la Figura 306 y en la Tabla 72.

Se observa un descenso paulatino en los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural global, difusa y mantenida* ( $DSg$ ,  $DSd$  y  $DSm$ ), siendo lineal en el caso de  $DSd$  y con un punto de inflexión en los modelos 05\_70 y 05\_50 en los indicadores  $DSg$  y  $DSm$  respectivamente a partir del cual aumenta la pendiente de las curvas.

En el caso de la *insolación excesiva* ( $SHGe$ ) se observa un descenso de los valores con punto de inflexión en el modelo 05\_80 y un ligero ascenso en el modelo 05\_30, mayor al valor registrado para el modelo 05\_50. Dicho incremento se debe a que tanto la *transmitancia solar* como el *coeficiente de ganancia solar* del vidrio escogido con una *transmitancia visible* del 30% son mayores que los correspondientes a los vidrios escogidos con una *transmitancia visible* del 50 y 40%, tal como se muestra en la Tabla 71.

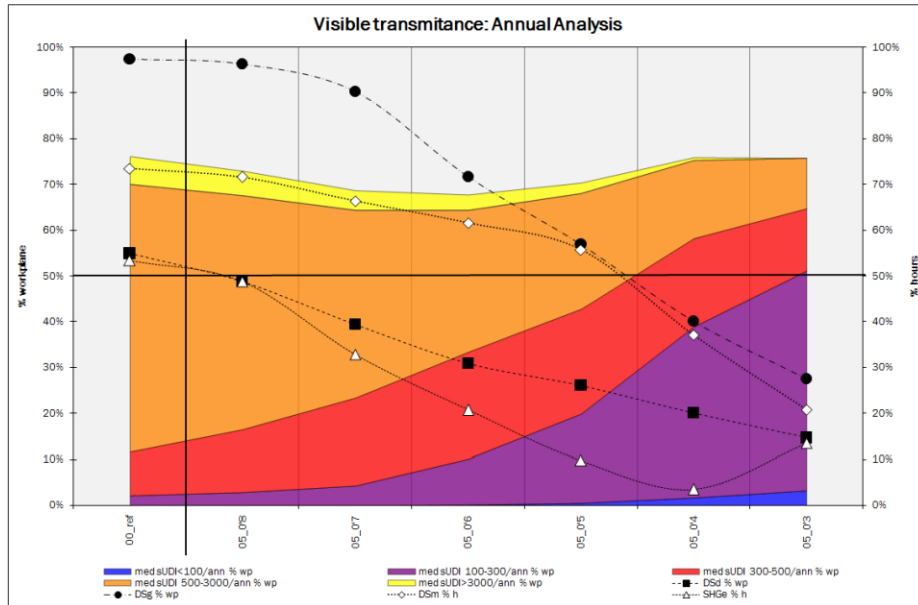


Figura 306: Serie 5: Transparencia del vidrio. Indicadores anuales. P.M. Esquivias

Se observa también que el requisito de *Suficiente Luz Natural* ( $DSg, DSd$  y  $DSm > 50\%$ ) sólo se alcanza mediante la componente difusa para una transmitancia visible mayor del 80%, y con una transmitancia visible de hasta el 50% si consideramos también la componente directa.

A medida que se reduce la transparencia del vidrio se reduce también el porcentaje del plano de trabajo que se encuentra con una iluminancia mayor de 500 lux y aumenta el porcentaje que se encuentra con un nivel de iluminación menor de 300 lux. El rango de iluminancias de 300 a 500 lux es el que presenta menores variaciones en todos los modelos con un rango de variación de ~14% entre los valores extremos. Así también para un  $SHGe$  menor del 40% la presencia de iluminancia excesiva en el plano de trabajo es menor del 5%.

Considerando la iluminancia natural útil simultánea suficiente, es decir, el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 3000 lux, se observa que no se alcanza el *criterio de iluminación natural suficiente* para una transparencia menor del 50%. Sin embargo también se observa una progresiva contribución del rango de iluminancias comprendidas entre 100 y 300 lux, así como una reducción de una iluminancia excesiva.

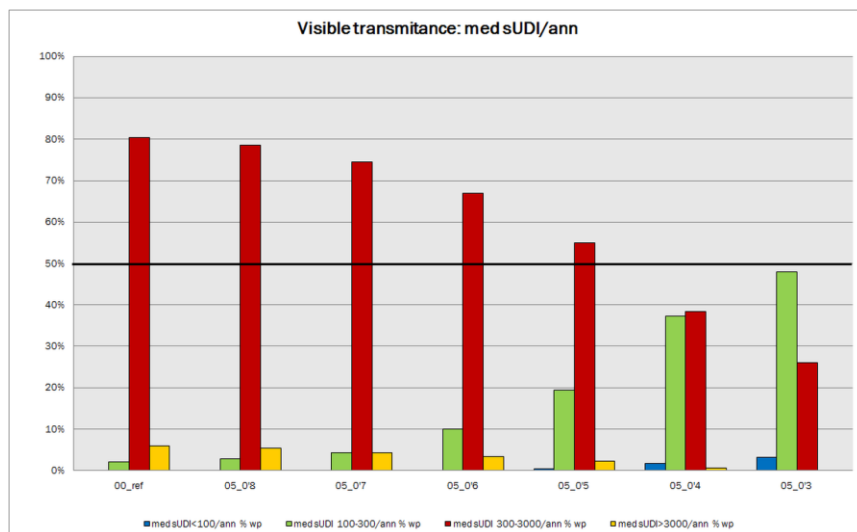


Figura 307: Transparencia de la ventana. mediana anual sUDI. P.M. Esquivias

	<i>sUDI</i> med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	<i>SHGe</i>
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
00_ref	0.00%	2.14%	9.51%	58.50%	6.06%	54.93%	97.38%	73.48%	53.43%
05_0'8	0.00%	2.85%	13.67%	51.13%	5.35%	48.75%	96.31%	71.58%	48.84%
05_0'7	0.00%	4.28%	19.14%	41.02%	4.28%	39.36%	90.37%	66.41%	32.78%
05_0'6	0.12%	9.99%	23.31%	31.03%	3.33%	30.92%	71.70%	61.61%	20.67%
05_0'5	0.48%	19.38%	22.95%	25.33%	2.26%	26.04%	56.96%	55.73%	9.74%
05_0'4	1.66%	37.22%	19.38%	17.12%	0.59%	20.10%	40.07%	37.07%	3.48%
05_0'3	3.21%	47.92%	13.67%	11.06%	0.00%	14.63%	27.47%	20.73%	13.45%

Tabla 72: Serie 5: Transparencia del vidrio. Indicadores anuales

Estos resultados en cierta forma concuerdan con los obtenidos por *Reinhart* [277] [323], *Dubois y Flodberg* [302] y *Shen y Tzempelikos* [278], todos ellos obtenidos mediante *Modelación climática de la Luz Natural*. Mientras la reducción de la transmitancia visible reduce la aparición de situaciones de deslumbramiento, adecuando las condiciones de iluminación natural a las de desarrollo de las tareas visuales y reduciendo el consumo de iluminación artificial, *Dubois y Flodberg* señalan que con una menor transparencia se necesita una mayor superficie de ventana para alcanzar los requisitos luminotécnicos, por lo que es preferible una menor superficie de ventana con mayor transparencia considerando también su afección al ambiente térmico.

Sólo *Shen y Tzempelikos* proponen valores de *transmitancia visible*, que es del 50% para las orientaciones Este, Oeste y Norte. Sin embargo, estos resultados pueden dar lugar a una mayor proporción del plano de trabajo que necesite de iluminación natural complementaria para poder desarrollar determinadas tareas visuales.

De hecho, con una transparencia menor del 50% se observa que no se cumplen los requisitos para la obtención de un espacio iluminado naturalmente al ser los valores de *DSg* y *DSm* menores del 50%. Por tanto, se deberá estudiar cuidadosamente aquellos proyectos en los que se considere incorporar vidrios con valores menores de transparencia.

Desde el punto de vista térmico, los estudios suelen centrarse en la variación de la *transmitancia térmica* más que en la variación del *Coefficiente de Ganancia Solar del Vidrio* [10] [143] [312] [313] [322], aunque ambos parámetros están relacionados, pero no linealmente. En este sentido *Lee* [312] afirma que la influencia del *Coefficiente de Ganancia Solar del Vidrio* es controvertido, ya que lo ideal es tener un alto valor durante el invierno y un valor bajo durante el verano, especialmente cuando existen grandes diferencias entre las demandas de calefacción y refrigeración.

Si bien todos coinciden en que a medida que se disminuye la *transmitancia térmica* se reduce el consumo anual de calefacción, habría que comprobar en qué medida se reduce la admisión de *ganancias solares*, ya que también afirman que apenas tiene efecto sobre la demanda de refrigeración de los espacios, aunque la demanda depende de la orientación de los espacios.

Por otro lado, *Bodart y De Herde* [10] señalan que a medida que se reduce la transmitancia visible aumenta el consumo energético de iluminación, para cualquier orientación, aunque no de forma lineal ya que para altos valores de transparencia se obtiene una alta penetración solar, aumentando el consumo de refrigeración.

Mientras *León et al* [322] señalan un ahorro energético global de hasta el 15% debido a un cambio en la *transmitancia térmica*, *Reinhart* [9] señala un ahorro en el consumo de iluminación artificial del 20% al reducir la transmitancia visible, cuestión que también señala *Lee* [312] en su estudio. No obstante, cabe señalar que varios estudios constatan que, al modificar las propiedades

de los huecos se llega a un punto en el que se desequilibra el balance energético, llegando a ser negativo, por lo que a la hora de estudiar el cambio de propiedades del vidrio debe realizarse de forma integral, considerando tanto el aspecto térmico como lumínico.

Los factores de proporcionalidad que guardan los diferentes indicadores respecto a los valores del modelo de referencia se muestran en la Tabla 73 y la Figura 308, donde se observa un crecimiento exponencial de la *Iluminancia Natural Útil simultánea sUDI<sub>100-300</sub>* al reducir la transparencia del vidrio. Como el indicador *sUDI<sub><100</sub>* en el modelo de referencia es 0%, éste no se incluye en el cálculo de la relación proporcional.

	<i>sUDI</i> med/ann				Daylight Sufficiency			<i>SHGe</i>
	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	
00_ref	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
05_0'8	1.33	1.44	0.87	0.88	0.89	0.99	0.97	0.91
05_0'7	2.00	2.01	0.70	0.71	0.72	0.93	0.90	0.61
05_0'6	4.67	2.45	0.53	0.55	0.56	0.74	0.84	0.39
05_0'5	9.06	2.41	0.43	0.37	0.47	0.58	0.76	0.18
05_0'4	17.39	2.04	0.29	0.10	0.37	0.41	0.50	0.07
05_0'3	22.39	1.44	0.19	0.00	0.27	0.28	0.28	0.25

Tabla 73: Serie 5: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia.

Se aprecia cómo la variación de la transparencia reduce drásticamente el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia comprendida entre 500 y 3000 lux, pero incrementa considerablemente el porcentaje con una iluminancia entre 100 y 300 lux.

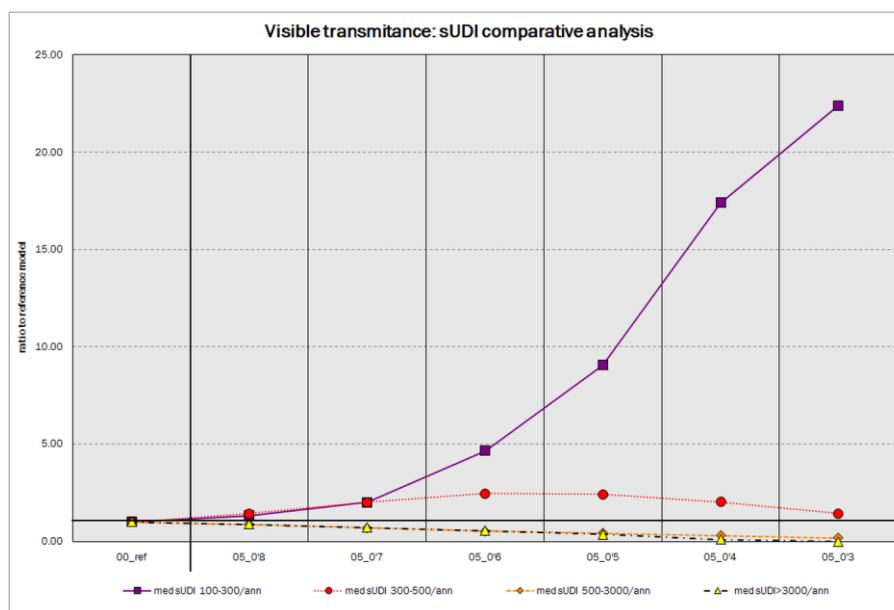


Figura 308: Variación del conjunto de indicadores *sUDI* respecto al modelo de referencia debido a la transparencia del vidrio. P.M. Esquivias

Tanto el indicador *sUDI<sub>500-3000</sub>* como *sUDI<sub>>3000</sub>* presentan un descenso lineal y el indicador *sUDI<sub>300-500</sub>* presenta una curva parabólica con máximo en el modelo 05\_0'6. *sUDI<sub>100-300</sub>*, sin embargo, presenta un fuerte crecimiento a medida que disminuye la transparencia del vidrio.

Tal como se observa en la Figura 309, el indicador *DSd* crece linealmente con la transmitancia visible del vidrio mientras el indicador *DSg* y *DSm* presentan un crecimiento en dos etapas: *DSg* tiene un crecimiento lineal moderado hasta una transmitancia visible del 70% siendo bastante pronunciado para los vidrios con transmitancia del 80 y 90%. Similar comportamiento muestra el

indicador  $DSm$ : crecimiento lineal moderado hasta una transmitancia visible de aproximadamente 50% y de mayor intensidad en los demás modelos.

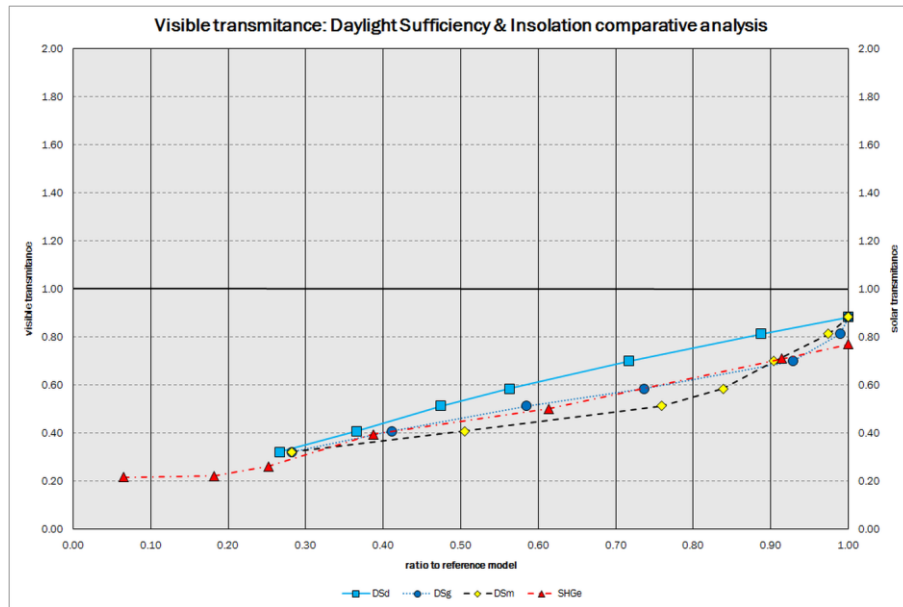


Figura 309: Variación de  $DSg$ ,  $DSd$ ,  $DSm$  y  $SHGe$  respecto al modelo de referencia debido a la transmitancia visible y solar del vidrio. P.M. Esquivias

En cuanto al indicador  $SHGe$ , dependiente de la transmitancia solar del vidrio, se observa que en los modelos con una transmitancia solar de aproximadamente 20%, vidrios ‘*Triple Low-e Argon*’ y ‘*Sage blue*’, hay disparidad de valores pese a la pequeña diferencia entre las propiedades de ambos, lo cual indica que existen otros factores que afectan a la entrada de *ganancia solar a través del vidrio*, como podría ser el color del vidrio. Para el resto de los modelos estudiados, a medida que aumenta la *transmitancia solar* del vidrio aumenta el valor que adquiere el indicador  $SHGe$ ; la pendiente de este tramo es de 0’654.

Respecto a la evolución mensual de los indicadores, se muestran las gráficas relativas a  $DSg$ ,  $SHGe$  y  $sUDI_{500-3000}$  [Figura 310, Figura 311, Figura 312]. Se observa que a medida que disminuye la transparencia del vidrio, se reduce el valor de  $DSg$ , primero en los meses estivales, luego alrededor del solsticio de invierno, y finalmente en los meses de las estaciones medias, formando en los menores valores de transparencia una curva en forma de V. Aunque se producen variaciones parciales entre las diferentes curvas, en general se aprecia una cierta similitud y paralelismo entre las curvas.

A partir de una transparencia del 50% empiezan a aparecer meses en los que no se alcanza un  $DSg$  mayor del 50%. Mientras en el caso de 50% se ciñe a un mes, en los casos de 40% y 30% se extiende a casi todo el año, por lo que estas dos opciones quedarían descartadas como opciones de diseño.

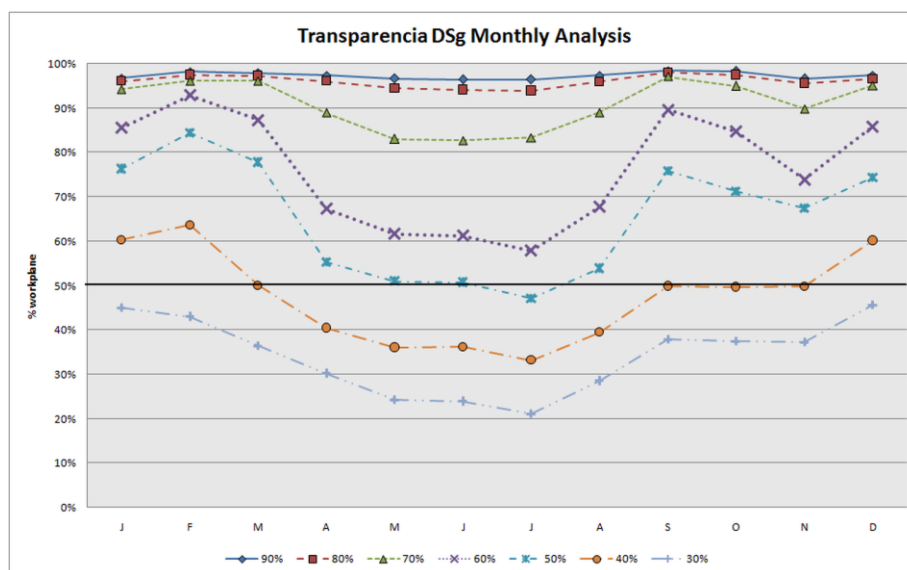


Figura 310: Valores mensuales de *DSG* según la transparencia del vidrio. P.M. Esquivias

Respecto a la variación de la *insolación excesiva*, se observa que a medida que se reduce la transparencia del vidrio se reduce especialmente en los meses estivales, el valor mensual de este indicador, y en menor medida en los demás meses del año, manteniendo un cierto paralelismo entre las diferentes curvas.

Aunque en esta investigación no se estudia el efecto sobre el consumo energético, si se puede intuir, a partir de los resultados, que a medida que se reduce la transparencia del vidrio aumenta el porcentaje del plano de trabajo que necesitará iluminación artificial complementaria. Además, debido a la reducción de la *Insolación excesiva*, puede llegarse al punto en que se aumente la demanda de calefacción.

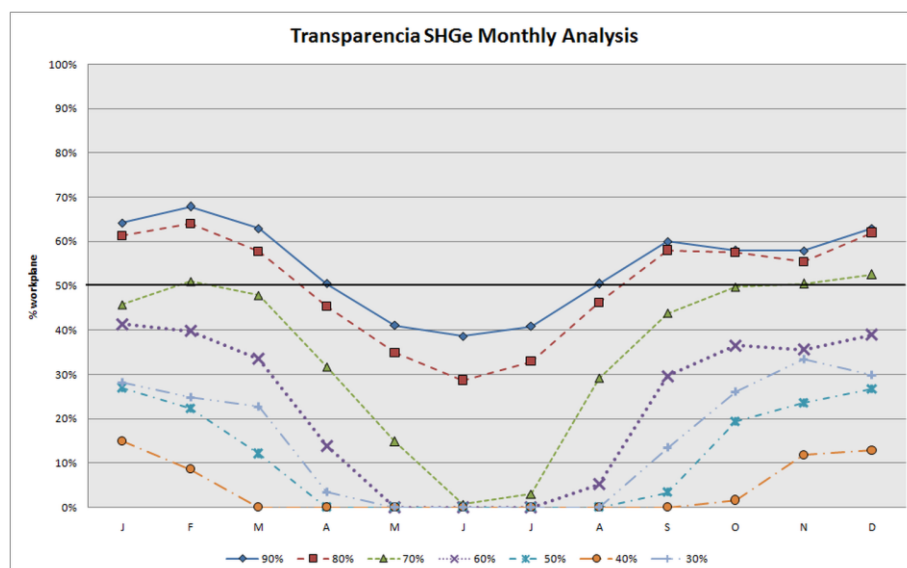


Figura 311: Valores mensuales de *SHGe* según la transparencia del vidrio. P.M. Esquivias

En cuanto al porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente una iluminancia comprendida entre 500 y 3000 lux, se observa que a medida que se reduce la transparencia, se reduce el valor mensual de este indicador de forma casi proporcional. Las mayores variaciones se encuentran en las curvas que corresponden a los modelos con mayor transparencia, especialmente alrededor de los equinoccios.

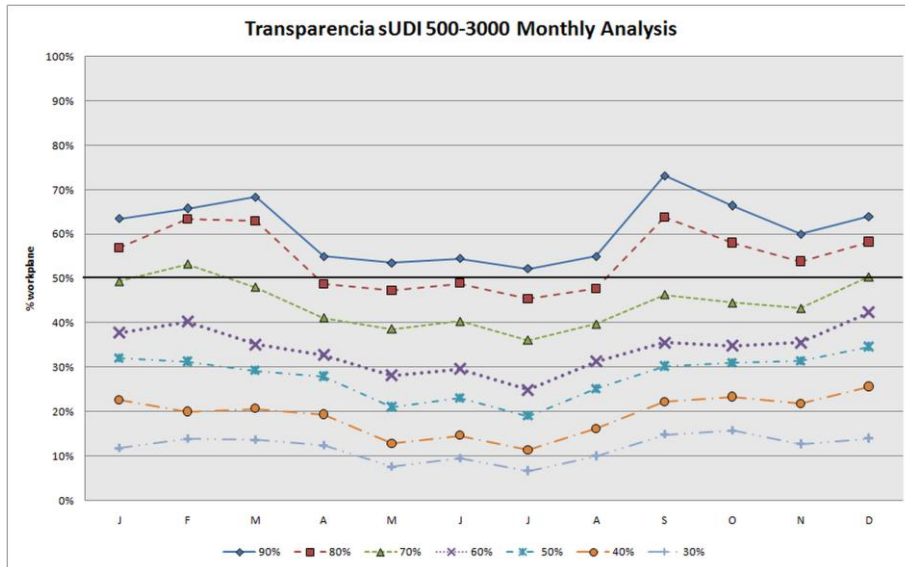


Figura 312: Valores mensuales de sUDI 500-3000 según la transparencia del vidrio. P.M. Esquivias

En los resultados de los modelos individuales, que se muestran en las «fichas de análisis-síntesis» [Anexo B], se observa cómo las propiedades físicas del vidrio afectan tanto a la distribución de valores de *Factor de Iluminación Natural* y de *Radiación Solar Incidente media anual* pero no a las *horas de soleamiento*, lo cual indica que aunque se reciben las mismas *horas de soleamiento*, la intensidad de la radiación que alcanza al plano de trabajo se ve afectada por la *transmitancia solar* de tal forma que la distribución de valores es similar a la componente difusa sin apenas verse influenciada por la componente directa que representan las *horas de soleamiento*.





### 4.4.1.3 Posición del hueco

Partiendo de la ventana de referencia, se plantean diferentes opciones, considerando la proximidad del hueco a los límites del paramento. La posición relativa de los huecos se expresa como una variación de la distancia del alféizar, el dintel y las jambas de la ventana a los límites del paramento.

Por convención, la posición derecha e izquierda se toma mirando al modelo frontalmente desde el exterior. La Tabla 74 muestra las posiciones objeto de estudio y las distancias que guarda el límite de la ventana con los paramentos que delimitan al plano de fachada, vistas desde el exterior. La Figura 313 muestra los modelos de cálculo creados a tal efecto.

Nº	Posición	Dist. Suelo (m)	Dist. Techo (m)	Dist. Pared Dcha (m)	Dist. Pared Izqda (m)
1	Centro-Centro (CC)	1.03	1.03	1.03	1.03
2	Centro-Dcha (CD)	1.03	1.03	0.00	2.05
3	Centro-Izqda (CI)	1.03	1.03	2.05	0.00
4	Superior-Centro (SC)	2.05	0.00	1.03	1.03
5	Superior-Dcha (SD)	2.05	0.00	0.00	2.05
6	Superior-Izqda (SI)	2.05	0.00	2.05	0.00
7	Inferior-Centro (IC)	0.00	2.05	1.03	1.03
8	Inferior-Dcha (ID)	0.00	2.05	0.00	2.05
9	Inferior-Izqda (II)	0.00	2.05	2.05	0.00

Tabla 74: Posiciones relativas y distancias a los paramentos

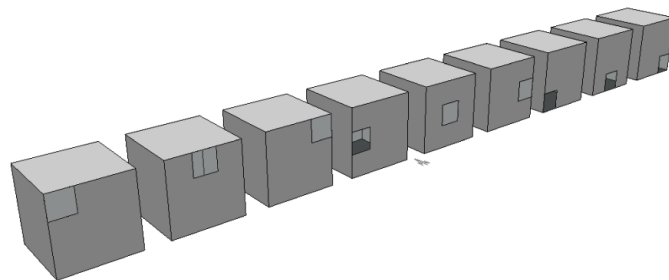


Figura 313: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie "Posición" en Ecotect. De izquierda a derecha: Posición de la ventana SI, SC, SD, CI, CC, CD, II, IC e ID. P.M. Esquivias

La evolución de los valores anuales de las condiciones de iluminación natural e insolación debido al cambio de la posición del hueco en la pared de fachada se muestra en la Figura 314 y en la Tabla 75.

Los modelos 06\_SC y 06\_IC son el resultado de desplazar el hueco en vertical hasta ubicarse en el límite superior e inferior de la fachada; los modelos 06\_CI y 06\_CD son el resultado de desplazar el hueco en horizontal hasta ubicarse en el límite izquierdo y derecho de la fachada; los demás modelos son una combinación de ambos desplazamientos.

La simetría que muestra el desplazamiento del hueco en horizontal se debe en cierta forma a que los indicadores de iluminación natural se basan en valores de iluminancia en los puntos de cálculo que se ubican en un plano, el plano de trabajo, de forma que los mapas de falso color pueden mostrar la direccionalidad de la luz natural y su variante incidencia. En el caso del traslado del hueco simétricamente al extremo derecho e izquierdo de la fachada provoca también variaciones simétricas a nivel mensual o anual.

Sin embargo, el indicador *insolación excesiva SHGe* no se basa en valores puntuales sino en valores volumétricos, es decir, la cantidad de *radiación solar directa* que entra a través del hueco,

por lo que se ve afectado por aquellos parámetros que modifican las características del hueco. La modificación de la posición del hueco, tal como se puede apreciar, apenas afecta a la *radiación solar* que entra a través del hueco.

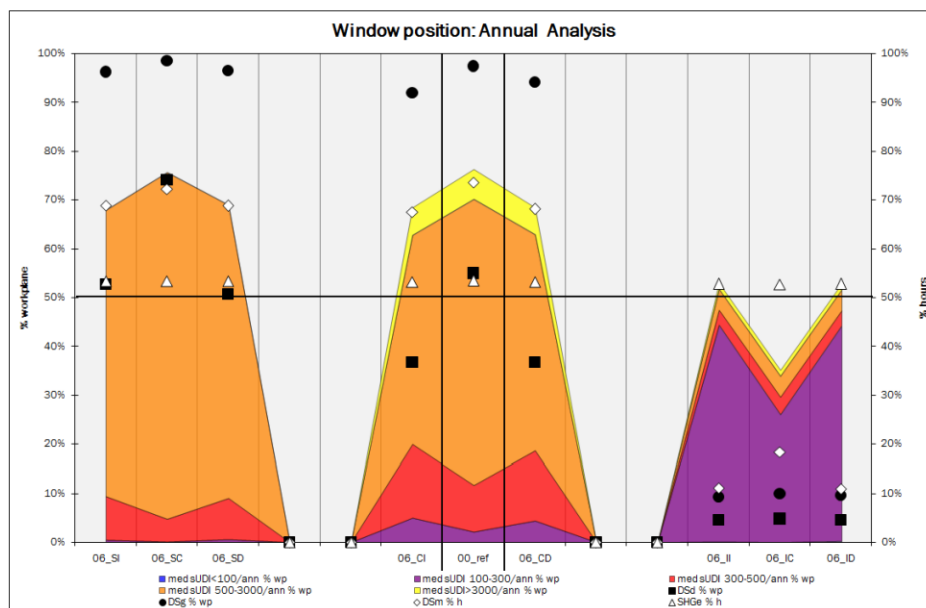


Figura 314: Serie 6: Posición del hueco. Indicadores anuales

Al mover el hueco a posiciones superiores se reduce el porcentaje del plano de trabajo con un nivel de iluminación entre 100 y 500 lux y se anula la porción que sobrepasa 3000 lux maximizando la cobertura del plano de trabajo con una iluminancia simultánea entre 500-3000 lux, siendo la posición superior idónea para espacios donde se desarrollen tareas de alta precisión visual.

Además, el modelo con el hueco en posición superior y centrada horizontalmente en la fachada proporciona los mayores valores de *Suficiencia de Iluminación Natural global y difusa (DSg y DSd)*. Sin embargo, se puede perder la visión del exterior, afectando a cuestiones más afines al campo de la psicología.

	sUDI med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	DSd	DSg	DSm	SHGe
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
06_SI	0.00%	0.48%	8.92%	58.50%	0.00%	52.68%	96.20%	68.78%	53.34%
06_SC	0.00%	0.12%	4.64%	70.87%	0.00%	74.08%	98.45%	72.15%	53.32%
06_SD	0.00%	0.59%	8.44%	59.93%	0.00%	50.65%	96.43%	68.76%	53.34%
06_CI	0.00%	4.99%	14.98%	42.81%	5.59%	36.62%	91.91%	67.46%	53.15%
00_ref	0.00%	2.14%	9.51%	58.50%	6.06%	54.93%	97.38%	73.48%	53.43%
06_CD	0.00%	4.40%	14.27%	44.23%	5.47%	36.62%	94.05%	68.08%	53.15%
06_II	0.12%	44.23%	3.09%	4.28%	1.19%	4.52%	9.27%	11.08%	52.77%
06_IC	0.00%	26.04%	3.57%	4.28%	1.19%	4.76%	9.87%	18.26%	52.62%
06_ID	0.24%	44.00%	3.09%	4.28%	1.19%	4.52%	9.51%	10.95%	52.77%

Tabla 75: Serie 6: Posición del hueco. Indicadores anuales

La terna de modelos con el hueco en posición inferior presenta una drástica reducción de las condiciones de iluminación natural, aunque no de *ganancias solares*. Este hecho se debe a que al estar el hueco de 0'95 m de altura ubicado rasante el suelo y al tener el plano de trabajo una cota sobre suelo de 0'80 m, sólo una porción del hueco, de 0'15 m de altura, se encuentra por encima del plano de trabajo. Sin embargo, al ser *SHGe* un indicador volumétrico, apenas se ve afectado por la posición relativa del plano de trabajo respecto al hueco.

La reducción de la superficie de hueco por encima del plano de trabajo se traduce en un importante aumento de la porción del plano de trabajo que tiene una iluminancia entre 100 y 300 lux, especialmente en los modelos en que los huecos se ubican en los límites laterales de la fachada, sin embargo ninguno de los modelos cumple con los requisitos de *Suficiencia de Iluminación Natural*, por lo que parece una posición idónea para aquellos espacios en los que se desarrollen tareas visuales de baja o muy baja precisión. También se observa que la porción del plano de trabajo que alcanza simultáneamente una iluminancia mayor de 300 lux es similar en los tres modelos.

Considerando la iluminancia natural útil simultánea suficiente, es decir, el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 3000 lux, se observa que se alcanza el *criterio de iluminación natural suficiente* en las posiciones central y superior. En el caso de las posiciones inferiores predomina la cobertura del plano de trabajo con una iluminancia comprendida entre 100 y 300 lux, sin llegar a la cobertura mínima.

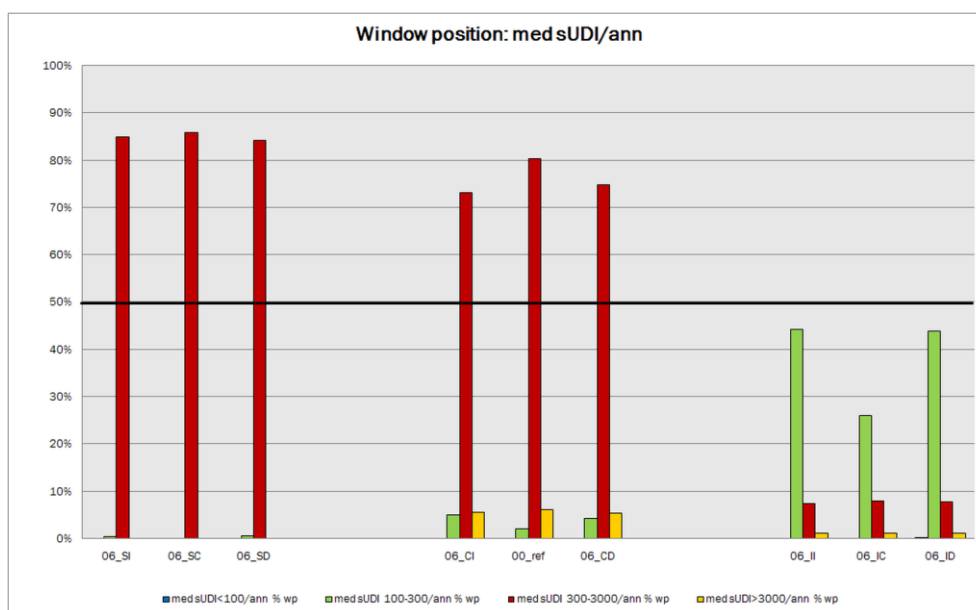


Figura 315: Posición de la ventana, mediana anual sUDI. P.M. Esquivias

La relación que guardan los valores centrales anuales de cada uno de los indicadores respecto a los valores del modelo de referencia se muestran en la Tabla 76 y en la Figura 316 y Figura 317. Como el indicador  $sUDI_{<100}$  en el modelo de referencia es 0%, éste no se incluye en el cálculo de la relación proporcional.

	sUDI med/ann				Daylight Sufficiency			SHGe
	100-300	300-500	500-3000	>3000	DSd	DSg	DSm	
O6_SI	0.22	0.94	1.00	0.00	0.96	0.99	0.94	1.00
O6_SC	0.06	0.49	1.21	0.00	1.35	1.01	0.98	1.00
O6_SD	0.28	0.89	1.02	0.00	0.92	0.99	0.94	1.00
O6_CI	2.33	1.58	0.73	0.92	0.67	0.94	0.92	0.99
00_ref	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
O6_CD	2.06	1.50	0.76	0.90	0.67	0.97	0.93	0.99
O6_II	20.67	0.32	0.07	0.20	0.08	0.10	0.15	0.99
O6_IC	12.17	0.38	0.07	0.20	0.09	0.10	0.25	0.98
O6_ID	20.56	0.32	0.07	0.20	0.08	0.10	0.15	0.99

Tabla 76: Serie 6: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia.

En un principio se podría establecer la hipótesis de que los modelos en los que el hueco está localizado en la esquina de la fachada presentarían unas condiciones de iluminación natural y de

soleamiento igual a la suma del efecto del desplazamiento horizontal y del desplazamiento vertical del hueco. Éstas vendrían expresadas en los valores adquiridos por los diferentes indicadores y se vería reflejada en los factores de proporcionalidad respecto al modelo de referencia.

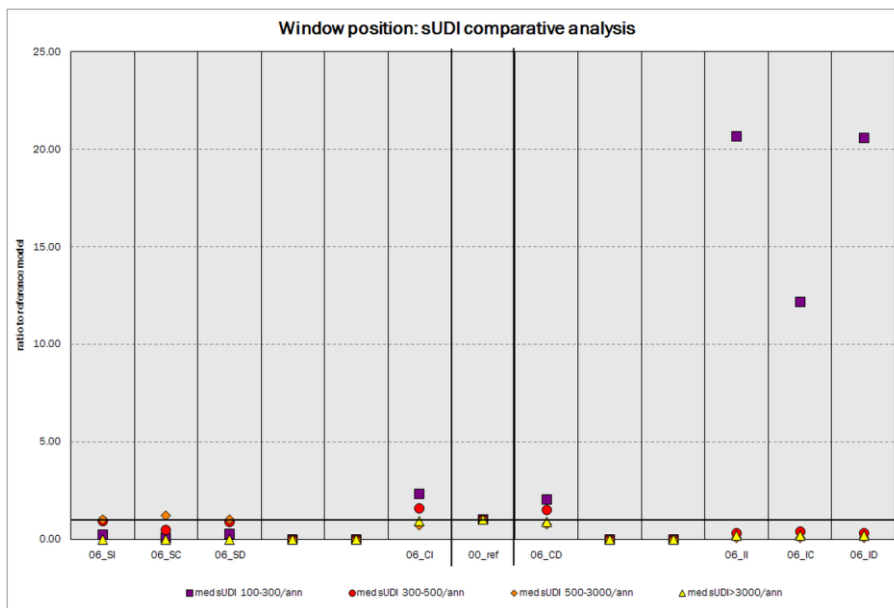


Figura 316: Variación del conjunto de indicadores *sUDI* respecto al modelo de referencia debido a la posición del hueco. *P.M. Esquivias*

Sin embargo, los factores obtenidos para los modelos con el hueco en la esquina no parecen ser el resultado de la aplicación de los factores correspondientes a los modelos predecesores; es decir, el valor del factor de proporcionalidad de *DSd* del modelo 06\_SD (0'92) no es resultado de aplicar al valor del modelo de referencia (1'00) el valor obtenido en el modelo 06\_SC (1'35) y el valor obtenido en el modelo 06\_CD (0'67).

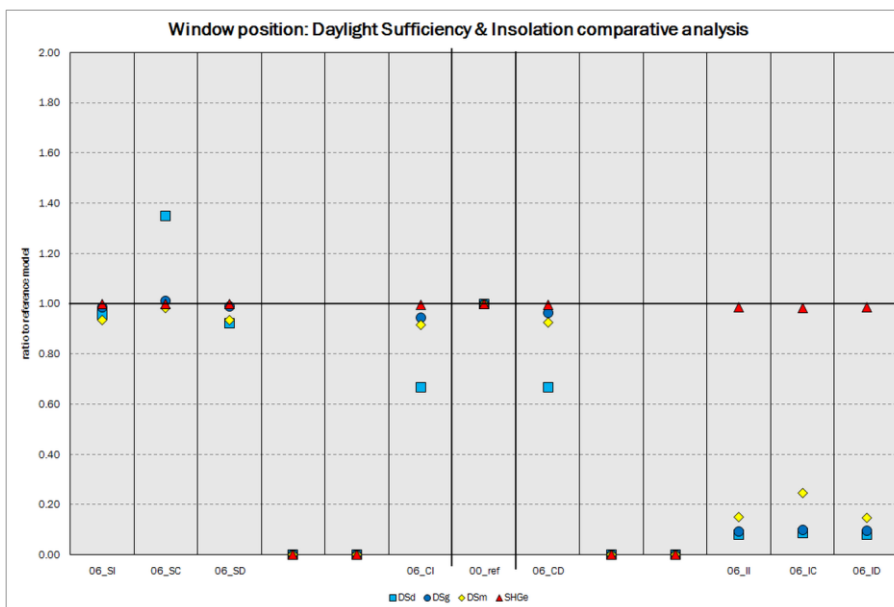


Figura 317: Variación de los indicadores *DSg*, *DSd*, *DSm* y *SHGe* respecto al modelo de referencia debido a la posición del hueco. *P.M. Esquivias*

Se observa también cómo, salvo en los modelos con el hueco en posición inferior, la modificación de la posición del hueco como máximo puede duplicar la porción de plano de trabajo

entre 100 y 300 lux, siendo apenas relevante su incidencia en los demás indicadores de iluminación natural e insolación.

Respecto a los indicadores  $DSg$ ,  $DSd$ ,  $DSm$  y  $SHGe$ , sólo se aprecian variaciones de los valores de  $DSd$  en las posiciones superior centro, laterales y las tres posiciones inferiores, y variaciones de  $DSm$  y  $DSg$  en las posiciones inferiores, permaneciendo los valores prácticamente constantes en casi todos los modelos.

Para analizar la evolución mensual de la posición del hueco sobre los indicadores de iluminación natural e insolación, se muestran, para los modelos más representativos, las gráficas de los indicadores en los que se produce una mayor variación, como son  $sUDI_{100-300}$ ,  $sUDI_{500-3000}$  y  $DSg$ .

Tal como se puede observar en las diferentes gráficas, el comportamiento de los modelos cuya ventana se encuentra en una posición inferior es completamente diferente al comportamiento de los modelos cuya ventana se encuentra en posición central o superior.

Se aprecia que cuando los valores de los indicadores son altos para los modelos de posición central o superior, son mínimos para los modelos de posición inferior; así también cuando se alcanza el máximo valor en algún indicador en los modelos con el hueco en posición inferior, las curvas mensuales muestran unos valores mínimos para dicho indicador para los modelos de posición central o superior.

En el caso de la  $DSg$ , las curvas que corresponden con los modelos de posición superior se encuentran entre las curvas correspondientes a los modelos de posición central. Tanto la posición central derecha como superior derecha presentan una fuerte bajada en el indicador para mayo, cuestión que puede deberse a la geometría solar.

Los modelos que se corresponden con la posición inferior del paramento no proporcionan un  $DSg$  mayor del 50% por lo que quedarían descartados como opciones de diseño.

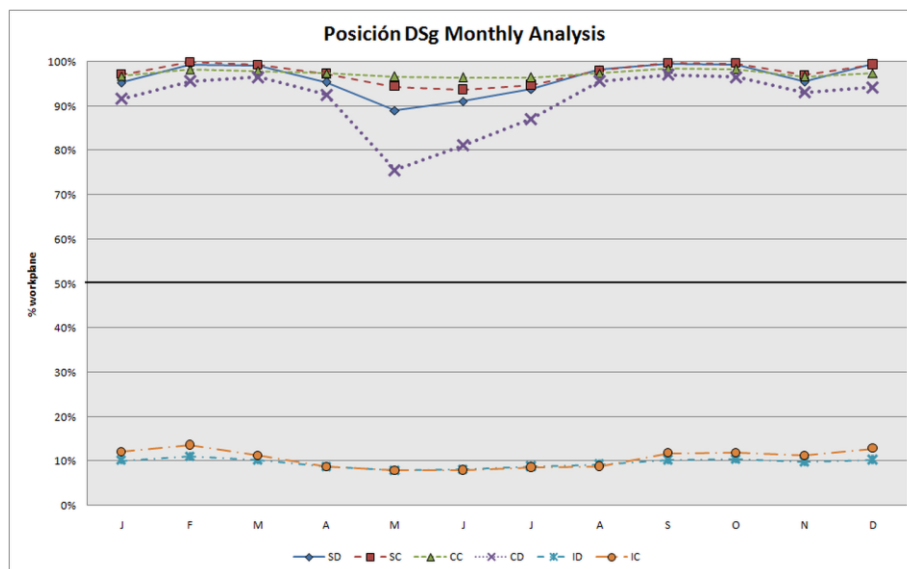


Figura 318: Valores mensuales de  $DSg$  en función de la posición del hueco. P.M. Esquivias

El cambio de posición del hueco dentro del paramento afecta principalmente a dos rangos de iluminancia simultánea: 100-300 lux y 500-3000 lux. Para el primer rango se observa que es el rango que más se ve favorecido por los modelos cuyo hueco se encuentra en la posición inferior del paramento, siendo prácticamente nulo en los demás casos.

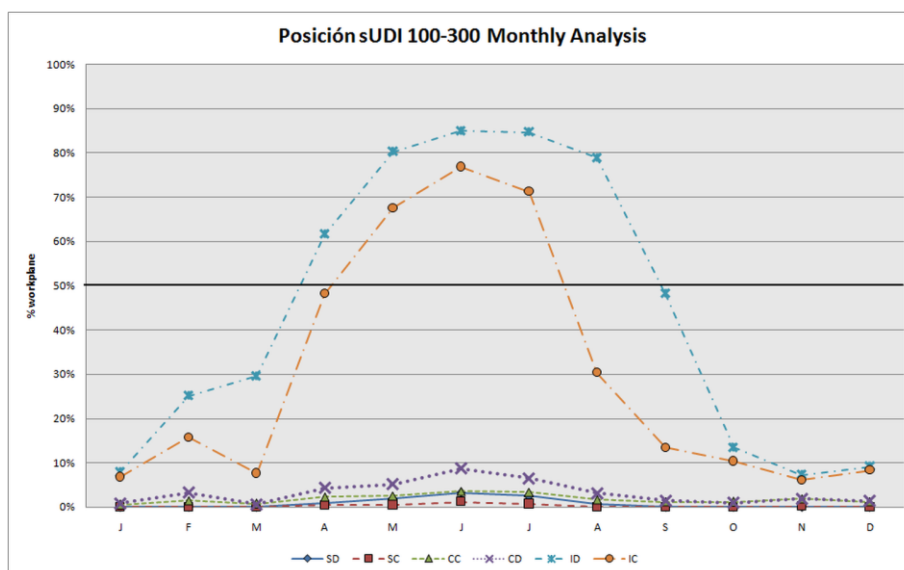


Figura 319: Valores mensuales de sUDI 100-300 en función de la posición. P.M. Esquivias

De forma inversa, el segundo rango es que más se ve afectado si el hueco pasa a tener una posición o central o superior dentro del paramento. Tanto en el caso anterior como éste, se observa cierto paralelismo entre las curvas.

En el caso del rango 500-3000 lux, es el modelo superior centro el que proporciona mayores porcentajes del plano de trabajo, durante prácticamente todo el año, seguido por el modelo superior-derecha y modelo central (de referencia), con comportamientos y valores muy aproximados.

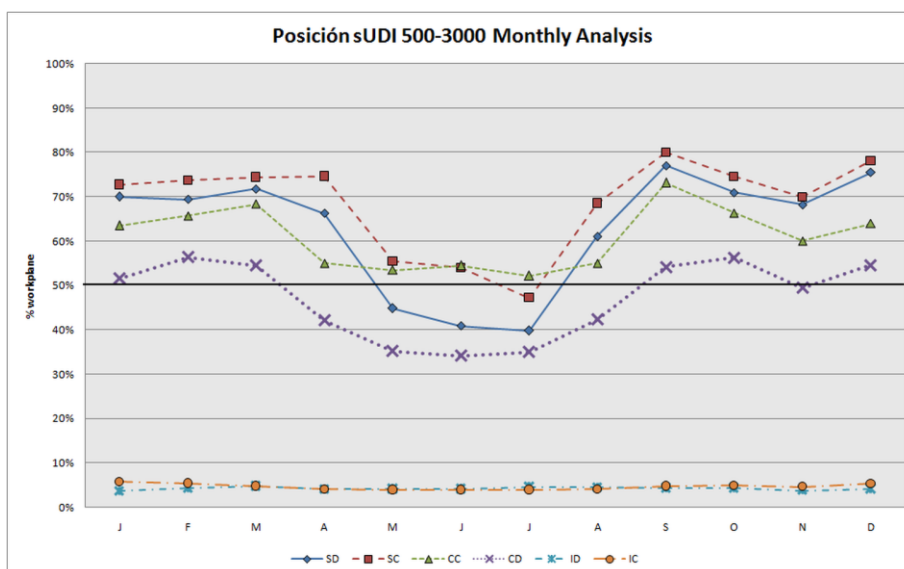


Figura 320: Valores mensuales de sUDI 500-3000 en función de la posición. P.M. Esquivias

Los resultados han mostrado que trasladar el hueco horizontalmente provoca la misma reducción de los valores centrales anuales del modelo tanto si se desplaza al extremo izquierdo como al extremo derecho.

Sin embargo, en los resultados de los modelos individuales, que se muestran en las «fichas de análisis-síntesis» [Anexo B], se observa que en los modelos en los que el hueco se ubica en el extremo izquierdo se reduce la cobertura del plano de trabajo entre 300 y 3000 lux por la tarde mientras que en los modelos en los que el hueco se ubica en el extremo derecho de la fachada la

cobertura se reduce durante las horas matinales. Es decir, aunque los valores anuales y mensuales son similares el comportamiento horario es diferente. La traslación a posiciones laterales tiene un leve efecto sobre las isolíneas, consecuencia de la actuación de la luz reflejada en el paramento al que se adhiere el hueco.

Tal como señalan los estudios, la posición del hueco, además de afectar a las condiciones cuantitativas, afecta principalmente de forma cualitativa. Los resultados obtenidos sobre la distribución en el plano de los valores de *Factor de Iluminación Natural* expresada mediante las curvas de iso-valores, se pueden comparar con las isolíneas que se muestran en el proyecto '*Daylight Design Variations Book*' [303].

Se observa que ambos resultados coinciden en cuanto a la separación del área de mayor valor de la ventana en posiciones altas, la mayor proximidad en la posición central y la reducida área de influencia de la ventana colocada en la posición inferior.

Atendiendo a lo analizado en el Estado del Arte y a lo observado en los resultados, se puede confirmar que la posición de la ventana redonda sobre la demanda de iluminación artificial [314]: Las ventanas localizadas en posiciones inferiores redundarán en una mayor demanda de iluminación artificial, pero las ventanas localizadas en posiciones altas no contribuyen especialmente a los objetivos luminotécnicos, aunque aumenta la homogeneidad respecto a la posición central. Si bien es cierto que las posiciones altas reducen la aparición de iluminancias excesivas y la posición central presenta un mayor porcentaje del plano de trabajo entre 300 y 500 lux.





#### 4.4.1.4 Forma del hueco

El *factor de forma* se define como la relación entre la anchura y la altura del hueco. Para contemplar las posibles variaciones, se plantean diferentes relaciones entre ambas dimensiones del hueco, manteniendo constante la superficie de hueco, dando lugar a las ventanas verticales, con una altura mayor que la anchura, y a las ventanas horizontales, con una anchura mayor que la altura, cubriendo un rango que abarca desde una relación de 0'10 a 10.

La modificación de la relación de ambas dimensiones, manteniendo la superficie de hueco, también afecta a la distancia que guardan su alféizar, su dintel y sus jambas a los límites del paramento, pese a mantener la posición central.

La Tabla 77 muestra los valores seleccionados para el *Factor de forma de la ventana* y los parámetros que se ven afectados, como las dimensiones de la ventana y la distancia a los paramentos que delimitan la fachada. La Figura 321 muestra los modelos de cálculo creados en *Ecotect*.

Nº	Factor de forma	Ancho (m)	Alto (m)	Dist. Paredes (m-m)	Dist Suelo-techo (m-m)
1	0.10 (1/10)	0.30	3.00	1.35-1.35	0.00-0.00
2	0.125 (1/8)	0.34	2.69	1.33-1.33	0.16-0.16
3	0.20 (1/5)	0.42	2.15	1.29-1.29	0.43-0.43
4	0.25 (1/4)	0.48	1.90	1.26-1.26	0.55-0.55
5	0.50 (1/2)	0.67	1.35	1.17-1.17	0.83-0.83
6	0.625 (1/1'6)	0.75	1.20	1.12-1.12	0.90-0.90
7	0.80 (1/1'25)	0.85	1.06	1.08-1.08	0.97-0.97
8	1.00 (1/1)	0.95	0.95	1.03-1.03	1.03-1.03
9	1.25 (1'25/1)	1.06	0.85	0.97-0.97	1.08-1.08
10	1.60 (1'6/1)	1.20	0.75	0.90-0.90	1.12-1.12
11	2.00 (2/1)	1.35	0.67	0.83-0.83	1.17-1.17
12	4.00 (4/1)	1.90	0.48	0.55-0.55	1.26-1.26
13	5.00 (5/1)	2.15	0.42	0.43-0.43	1.29-1.29
14	8.00 (8/1)	2.69	0.34	0.16-0.16	1.33-1.33
15	10.00 (10/1)	3.00	0.00	0.00-0.00	1.35-1.35

Tabla 77: Valores del Factor de Forma y de los parámetros afectados

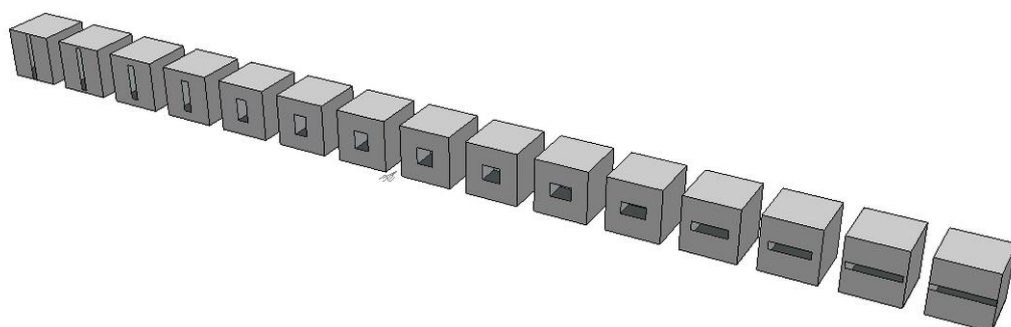


Figura 321: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie "Forma" en *Ecotect*. De la relación 0'1 (ventana con la máxima altura) a la relación 10 (ventana con la máxima anchura). *P.M. Esquivias*

El impacto de la modificación del coeficiente de forma del hueco, relación anchura: altura, sobre los indicadores anuales de iluminación natural e insolación se muestran en la Figura 322, cuyos valores numéricos se exponen en la Tabla 78.

Siendo el modelo 07\_1:10 el que representa a un hueco cuya altura es igual a la altura de la fachada, hueco vertical, y el modelo 07\_10:1 el que representa a un hueco cuya anchura es igual a la anchura de la fachada, hueco horizontal, se observa que las mayores variaciones en la *Suficiencia de Iluminación Natural global, difusa y mantenida (DSg, DSd y DSm)* tienen lugar en aquellos modelos en los que la altura del hueco es menor que su anchura.

	sUDI/med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	DSd	DSg	DSm	SHGe
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
07_1-10	0.00%	3.57%	14.74%	39.60%	2.85%	36.86%	92.15%	64.77%	52.83%
07_1:8	0.00%	3.21%	13.08%	43.04%	3.33%	39.48%	93.82%	65.96%	53.53%
07_1-5	0.00%	2.97%	12.49%	46.61%	4.16%	42.93%	95.24%	68.35%	53.43%
07_1-4	0.00%	2.85%	11.77%	48.87%	4.99%	45.18%	95.96%	69.98%	53.49%
07_1-2	0.00%	2.62%	10.58%	53.03%	6.42%	50.65%	96.79%	72.18%	53.43%
07_1-1'6	0.00%	2.50%	10.70%	54.22%	6.66%	50.65%	97.03%	72.60%	53.32%
07_1-1'25	0.00%	2.14%	10.11%	56.48%	6.78%	53.98%	97.38%	73.37%	53.36%
00_ref	0.00%	2.14%	9.51%	58.50%	6.06%	54.93%	97.38%	73.48%	53.43%
07_1'25-1	0.00%	1.90%	9.75%	58.86%	6.06%	54.82%	97.62%	73.61%	53.36%
07_1'6-1	0.00%	1.55%	9.87%	59.81%	5.83%	55.05%	97.74%	73.93%	53.36%
07_2-1	0.00%	1.66%	9.27%	60.88%	5.95%	55.17%	97.86%	74.01%	53.43%
07_4-1	0.00%	1.07%	9.75%	61.83%	5.95%	57.55%	98.34%	74.57%	53.53%
07_5-1	0.00%	0.95%	11.41%	61.12%	3.69%	56.00%	97.86%	74.40%	53.06%
07_8-1	0.00%	0.36%	11.06%	62.31%	4.28%	56.72%	97.86%	74.55%	53.53%
07_10-1	0.00%	0.24%	14.15%	59.93%	3.45%	54.93%	97.50%	74.29%	52.96%

Tabla 78: Serie 7: Forma del hueco. Indicadores anuales

Probablemente, tal como se expuso en la serie ‘Posición del hueco’, esta mayor variación de las condiciones de iluminación natural en los huecos verticales se deba a que parte de la superficie del hueco se encuentra por debajo de la cota del plano de trabajo, donde se sitúan los puntos de cálculo.

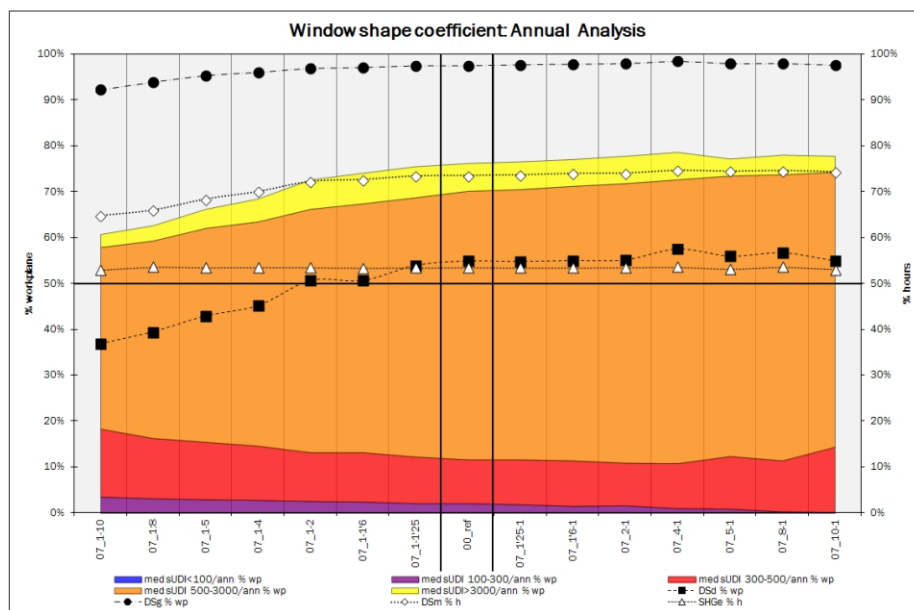


Figura 322: Serie 7: Forma del hueco. Indicadores anuales. P.M. Esquivias

De hecho, en el modelo 07\_1:2 el hueco se encuentra en su totalidad por encima de la altura del plano de trabajo y en el modelo 07\_1:4 parte de la superficie del hueco está por debajo del

plano de trabajo lo cual se refleja en la mayor diferencia relativa de los valores de los indicadores, especialmente en el indicador *DSd*, que no cumple con el requisito de *Suficiente Luz Natural* en los modelos en los que el *coeficiente de forma* del hueco varía de 1:10 a 1:4.

En general, los indicadores *DSg*, *DSd*, *DSm*, *sUDI<sub>500-3000</sub>* presentan una tendencia ascendente desde el hueco vertical al hueco horizontal, mientras el indicador *sUDI<sub>100-300</sub>* se reduce y *sUDI<sub>>3000</sub>* muestra una evolución parabólica con los valores mínimos en los extremos de la serie. Además, una vez toda la superficie del hueco se encuentra por encima del nivel del plano de trabajo, cuantitativamente apenas se aprecian variaciones en los indicadores.

En cuanto al indicador *insolación excesiva (SHGe)* se observa que en los resultados anuales apenas se aprecia diferencia en los valores centrales al modificar el *coeficiente de forma* del hueco. Es en los resultados individuales horarios y mensuales donde se puede apreciar la mínima variación en las ganancias solares a través del hueco exterior debido a la modificación de la forma.

Considerando la iluminancia natural útil simultánea suficiente, es decir, el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 3000 lux, se observa que la variación del coeficiente de forma apenas tiene influencia en la cobertura del plano de trabajo con iluminancia natural útil para el desarrollo de tareas visuales de media y alta precisión.

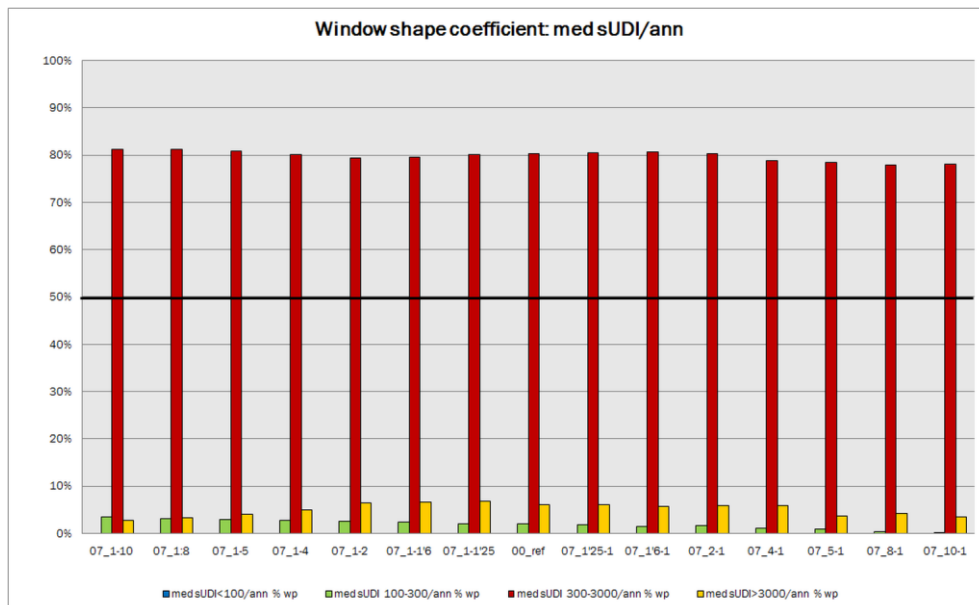


Figura 323: Forma de la ventana. mediana anual *sUDI*. P.M. Esquivias

La relación entre los valores de los diferentes indicadores en el modelo de referencia y los obtenidos por cada uno de los modelos de la serie se expone en la Tabla 79. Como el indicador *sUDI<sub><100</sub>* en el modelo de referencia es 0%, éste no se incluye en el cálculo de la relación proporcional.

Cabe señalar que el modelo 07\_4:1, en el que la anchura del hueco es cuatro veces su altura, proporciona los valores máximos de *Suficiencia de Iluminación Natural global, difusa y mantenida* aumentando la porción del plano de trabajo de utilidad para el desarrollo de tareas visuales de media y alta precisión a la vez que reduce ligeramente el área sobreiluminada y con una iluminancia menor de 300 lux.

La mayoría de las apreciaciones del estado del arte respecto a la forma de la ventana se relacionan con el campo de la percepción del espacio por parte del usuario, no siendo éste el

objeto de la investigación. No obstante deberán tenerse en cuenta si se desean crear determinadas sensaciones en los ocupantes del espacio.

	sUDI/med/ann				Daylight Sufficiency			SHGe
	100-300	300-500	500-3000	>3000	DSd	DSg	DSm	
07_1-10	1.67	1.55	0.68	0.47	0.67	0.95	0.88	0.99
07_1:8	1.50	1.38	0.74	0.55	0.72	0.96	0.90	1.00
07_1-5	1.39	1.31	0.80	0.69	0.78	0.98	0.93	1.00
07_1-4	1.33	1.24	0.84	0.82	0.82	0.99	0.95	1.00
07_1-2	1.22	1.11	0.91	1.06	0.92	0.99	0.98	1.00
07_1-1'6	1.17	1.13	0.93	1.10	0.92	1.00	0.99	1.00
07_1-1'25	1.00	1.06	0.97	1.12	0.98	1.00	1.00	1.00
00_ref	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
07_1'25-1	0.89	1.03	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
07_1'6-1	0.72	1.04	1.02	0.96	1.00	1.00	1.01	1.00
07_2-1	0.78	0.97	1.04	0.98	1.00	1.00	1.01	1.00
07_4-1	0.50	1.03	1.06	0.98	1.05	1.01	1.01	1.00
07_5-1	0.44	1.20	1.04	0.61	1.02	1.00	1.01	0.99
07_8-1	0.17	1.16	1.07	0.71	1.03	1.00	1.01	1.00
07_10-1	0.11	1.49	1.02	0.57	1.00	1.00	1.01	0.99

Tabla 79: Serie 7: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia

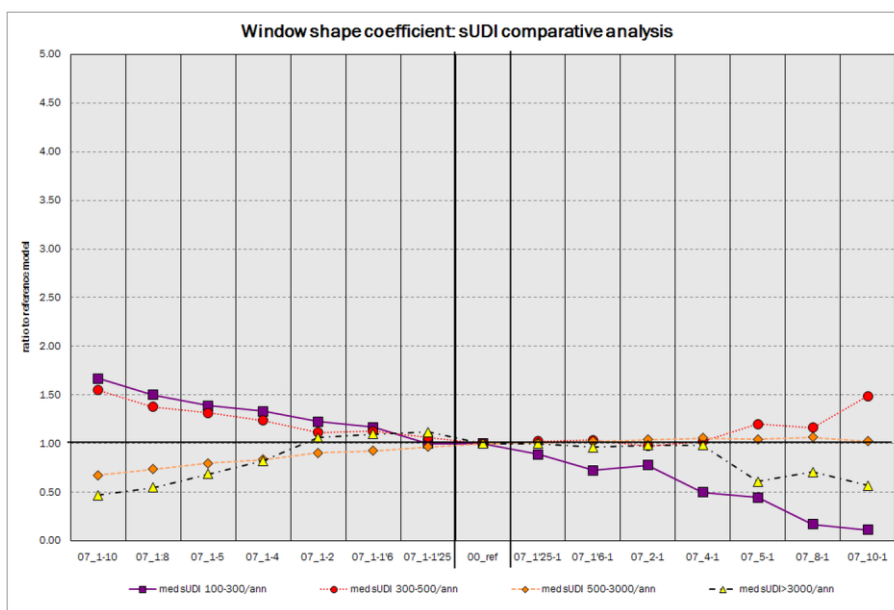


Figura 324: Variación del conjunto de indicadores sUDI respecto al modelo de referencia debido a la forma del hueco. P.M. Esquivias

Las gráficas muestran un comportamiento relativamente simétrico en el rango de iluminancias mayores de 3000 lux y entre 300 y 500 lux. Sin embargo el rango comprendido entre 100 y 300 lux parece ser máximo con el hueco vertical y mínimo > con el hueco horizontal. Comportamiento inverso se produce en el rango entre 500 y 3000 lux.

Tal como se comentó anteriormente, la reducción en las iluminancias pueden deberse a la presencia de parte de la superficie acristalada por debajo del plano de trabajo, por lo que reduce negativamente en la iluminación del mismo.

También se observan ciertas diferencias en los modelos de hueco más horizontales que pueden deberse a la contribución de la componente reflejada en los paramentos laterales perpendiculares al hueco.

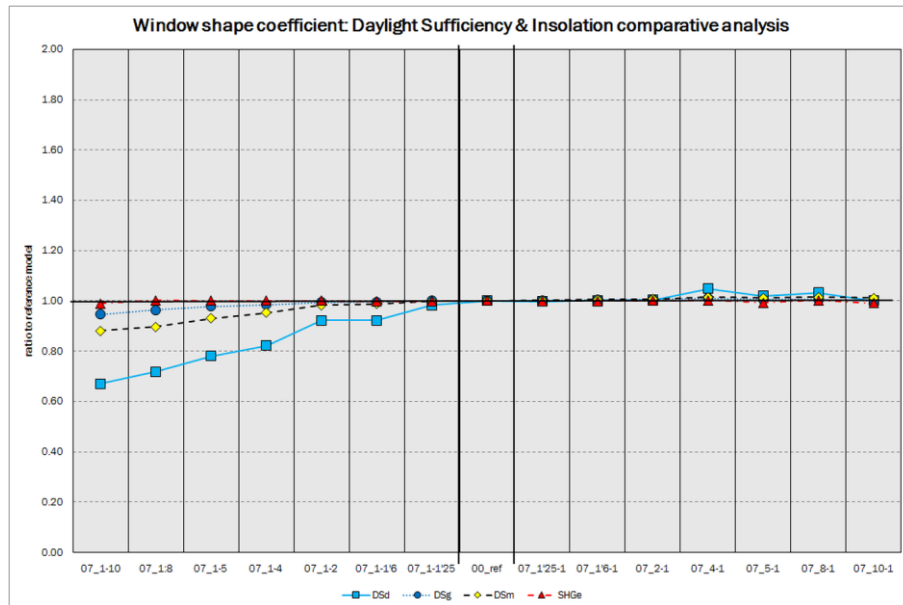


Figura 325: Variación de los indicadores  $DSg$ ,  $DSd$ ,  $DSm$  y  $SHGe$  respecto al modelo de referencia debido a la forma del hueco. P.M. Esquivias

Respecto a la evolución mensual de los indicadores, se muestra el indicador  $sUDI_{500-3000}$ , para apreciar las variaciones mensuales en los diferentes modelos.

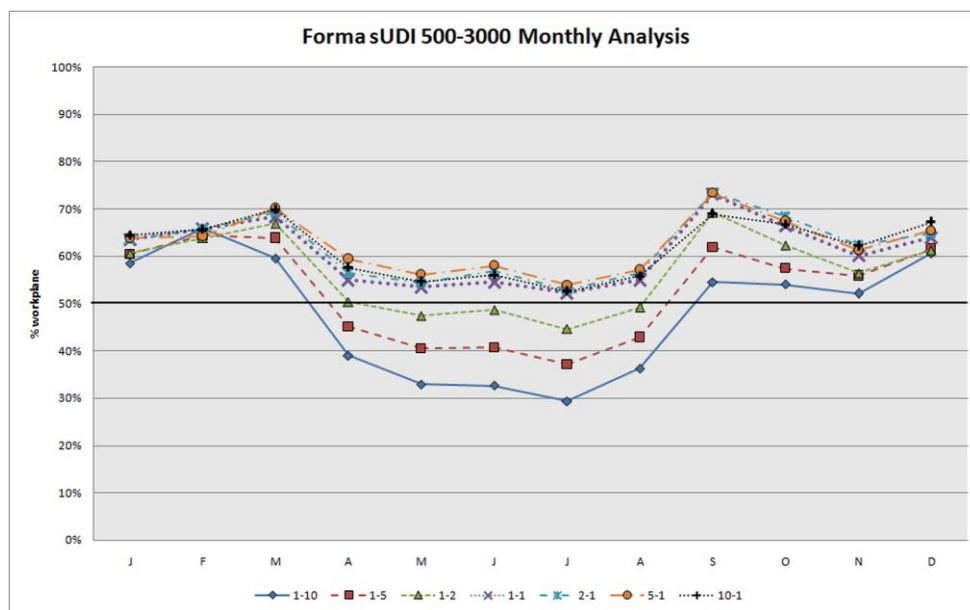


Figura 326: Valores mensuales de  $sUDI_{500-3000}$  según la forma del hueco. P.M. Esquivias

Se observa que aunque las curvas permanecen prácticamente paralelas, las mayores diferencias en los valores pueden encontrarse en los meses estivales, aumentando la distancia entre las curvas.

Aunque las diferencias cuantitativas no son de gran relevancia, cualitativamente la modificación del *coeficiente de forma* del hueco se traduce en un cambio en la distribución de valores en el plano de trabajo, tal como se puede observar en las «fichas de análisis-síntesis» [Anexo B].

En el caso de la forma de las isolíneas de *Factor de Iluminación Natural* se observa que, aunque se mantiene el alcance en la profundidad del espacio, a medida que la ventana cambia desde el hueco vertical al hueco horizontal las isolíneas aumentan en extensión hasta cubrir toda la anchura del espacio. Similar comportamiento muestran las isolíneas de *Radiación Solar Incidente Media Anual*.

Las isolíneas de las *horas soleamiento* muestran cómo a medida que el hueco aumenta su anchura aumenta la penetración solar en el espacio hasta alcanzar la profundidad de saturación, que en el caso de la isolínea de 5% se encuentra a 1'50 m de la fachada. También se observa que al aumentar la anchura del hueco las isolíneas de mayor valor se separan del hueco alcanzando casi la mitad del espacio.

Estos resultados concuerdan con los expuestos en el proyecto '*Daylight Design Variations Book*' [303] donde se observa que las isolíneas de *Factor de Iluminación Natural* en las ventanas verticales se concentran alrededor del límite de la ventana, mientras en las ventanas horizontales presentan líneas paralelas a la fachada acristalada, cubriendo la anchura del espacio. Sin embargo, pese a lo apuntado en el estado del arte [4] [95] [253], las ventanas verticales no parece que arrojen unas isolíneas de mayor penetración que las arrojadas por las ventanas horizontales.

#### 4.4.1.5 División del hueco

Para estudiar el efecto de esta opción proyectual, se plantea la creación de una matriz cuyo número de filas y columnas corresponde con la división de la superficie de hueco en sentido vertical (del suelo al techo) y en sentido horizontal (de pared a pared) respectivamente. Esta superficie dividida se distribuye equitativamente, de forma que la distancia entre los huecos resultantes es igual a la distancia que guardan los huecos extremos con los límites del paramento de fachada.

Al dividir la superficie en diferentes partes se ven afectados otros parámetros relativos a la geometría de la ventana como el coeficiente de forma. En total se plantean 13 variaciones sobre la división y distribución de la superficie de hueco en la superficie de la fachada [Figura 327]. La Tabla 80 muestra sus características geométricas, así como los valores de los parámetros afectados:

Nº	Matriz	Nº huecos	Factor de Forma	Ancho (m)	Alto (m)	Dist. Horizontal (m)	Dist. Vertical (m)
1	1x1	1	1.00	0.95	0.95	1.03	1.03
2	2x1	2	2.00	0.95	0.475	1.03	0.68
3	3x1	3	3.00	0.95	0.317	1.03	0.51
4	4x1	4	4.00	0.95	0.238	1.03	0.41
5	5x1	5	5.00	0.95	0.190	1.03	0.34
6	1x2	2	0.50	0.475	0.95	0.68	1.03
7	1x3	3	0.33	0.317	0.95	0.51	1.03
8	1x4	4	0.25	0.238	0.95	0.41	1.03
9	1x5	5	0.20	0.190	0.95	0.34	1.03
10	2x2	4	1.00	0.475	0.475	0.68	0.68
11	3x3	9	1.00	0.317	0.317	0.51	0.51
12	4x4	16	1.00	0.238	0.238	0.41	0.41
13	5x5	25	1.00	0.190	0.190	0.34	0.34

Tabla 80: Opciones de división de ventana y parámetros afectados

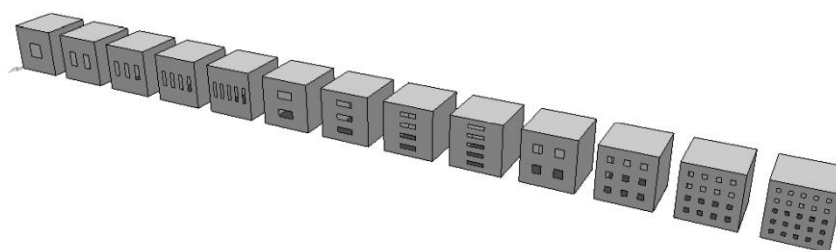


Figura 327: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie "División" en *Ecotect*. De la 1x1 a la matriz 5x5. P.M. Esquivias

La evolución de los valores anuales de las condiciones de iluminación natural e insolación debido a la división del hueco y su distribución homogénea en la fachada se muestra en la Figura 328 y en la Tabla 81.

El primer conjunto de modelos corresponden con la división del hueco en diferentes columnas, manteniendo la altura del hueco; el segundo corresponde con la división del hueco en diferentes filas, manteniendo la anchura del hueco; y el tercer conjunto corresponde con la división del hueco según una matriz de igual número de filas y columnas, manteniendo el factor de forma en 1 y distribuidos de forma uniforme en la pared de fachada. En todos los casos se mantiene la superficie relativa del hueco.

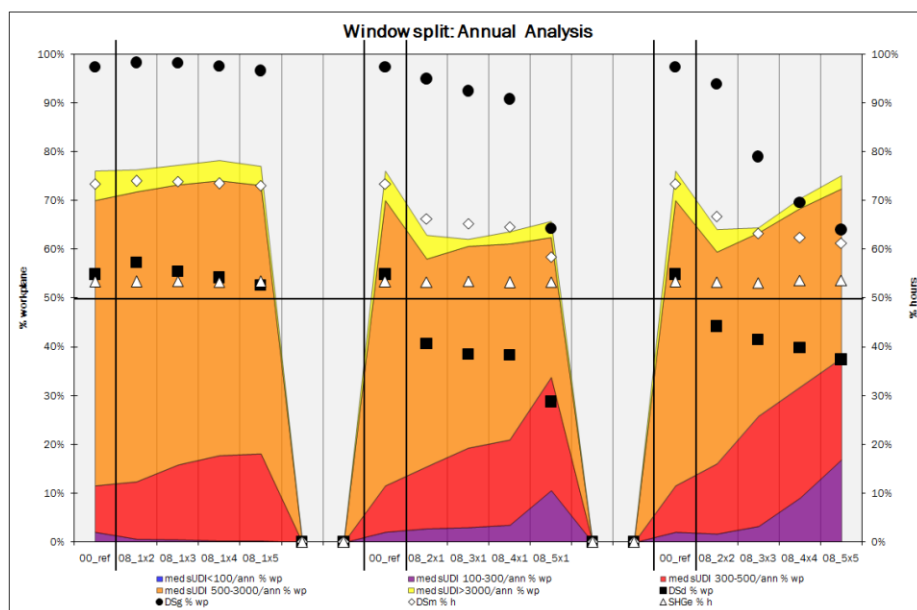


Figura 328: Serie 8: División del hueco. Indicadores anuales. P.M. Esquivias.

En general se observa que el primer conjunto conserva valores parecidos al modelo de referencia mientras que en los otros dos conjuntos las condiciones de iluminación natural e insolación se ven más alteradas. Posiblemente la causa de las variaciones se deba a la presencia de superficie de hueco por debajo del plano de trabajo como consecuencia de la división del hueco en varias filas y su distribución homogénea en la superficie de la fachada.

También se observa que los valores de *insolación excesiva (SHGe)* permanecen prácticamente constantes en todos los modelos. Esto se debe a que se basa en resultados de cálculo de carácter volumétrico, no puntual. Esto es, se deriva de la cantidad de radiación solar directa que entra a través del hueco, por lo que no se ve afectado por la división del mismo mientras se mantenga constante la superficie de hueco.

	sUDI/med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	DSd	DSg	DSm	SHGe
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
00_ref	0,00%	2,14%	9,51%	58,50%	6,06%	54,93%	97,38%	73,48%	53,43%
08_1x2	0,00%	0,71%	11,77%	59,45%	4,52%	57,31%	98,34%	74,03%	53,43%
08_1x3	0,00%	0,59%	15,34%	57,43%	4,04%	55,53%	98,22%	74,01%	53,53%
08_1x4	0,00%	0,36%	17,48%	56,36%	4,16%	54,22%	97,62%	73,56%	53,38%
08_1x5	0,00%	0,36%	17,84%	55,05%	3,92%	52,68%	96,67%	73,09%	53,43%
08_2x1	0,00%	2,85%	12,72%	42,57%	4,88%	40,67%	95,01%	66,30%	53,38%
08_3x1	0,00%	3,09%	16,29%	41,38%	1,43%	38,53%	92,51%	65,28%	53,51%
08_4x1	0,00%	3,57%	17,48%	40,19%	2,50%	38,41%	90,84%	64,70%	53,24%
08_5x1	0,00%	10,70%	23,19%	28,66%	3,33%	28,78%	64,33%	58,47%	53,32%
08_2x2	0,00%	1,78%	14,39%	43,40%	4,64%	44,23%	93,94%	66,84%	53,38%
08_3x3	0,00%	3,33%	22,59%	37,57%	1,07%	41,50%	79,07%	63,34%	53,19%
08_4x4	0,00%	9,16%	22,71%	36,62%	2,02%	39,83%	69,68%	62,50%	53,64%
08_5x5	0,00%	17,00%	20,81%	34,72%	2,73%	37,46%	64,09%	61,26%	53,68%

Tabla 81: Serie 8: División del hueco. Indicadores anuales

Si se divide la superficie del hueco en diferentes columnas, conjunto 1, se observa que la *Suficiencia de Iluminación Natural global, difusa y mantenida (DSg, DSd y DSm)* presentan un



comportamiento parabólico alcanzando el máximo  $DSg$  y  $DSd$  el modelo de 2 huecos y el máximo  $DSm$  el modelo de referencia, estando los valores mínimos en el modelo de mayor división.

Si se divide la superficie del hueco en diferentes filas, conjunto 2, se observa un fuerte detrimento de los valores  $DSg$ ,  $DSd$  y  $DSm$ ; especialmente en el modelo de mayor división. Este descenso en los valores es más lineal en los valores  $DSg$ , produciéndose un salto entre el modelo de referencia y los demás modelos en los valores de  $DSd$  y  $DSm$ . Con la división del hueco en filas, ninguno de los modelos derivados del modelo de referencia alcanza un  $DSd$  mayor del 50%.

Si se divide la superficie del hueco en filas y columnas formando una matriz, conjunto 3, se observa un fuerte descenso de los valores de  $DSg$ , que no es tan pronunciado en los valores de  $DSd$  y  $DSm$ . Con la división del hueco en matriz, ninguno de los modelos derivados del modelo de referencia alcanza un  $DSd$  mayor del 50%.

Considerando la iluminancia natural útil simultánea suficiente, es decir, el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 3000 lux, se observa que en todos los casos, se alcanza una cobertura del plano de trabajo mínima del 60%, superando, por tanto, el requisito mínimo.

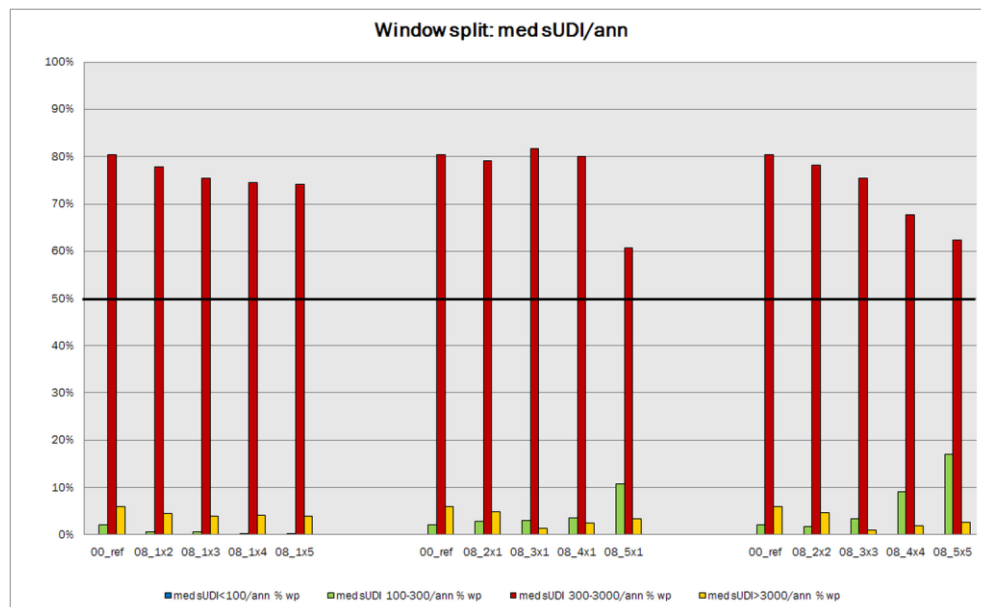


Figura 329: División de la ventana. mediana anual  $sUDI$ . P.M. Esquivias

En los tres conjuntos se observa que la división del hueco afecta positivamente en el rango de iluminancias útiles de 300 a 500 lux, y en ocasiones al rango 100-300 lux a costa de la disminución de porcentaje de plano en los demás rangos [Tabla 82].

Los resultados muestran que la división del hueco en diferentes partes no afecta a la *Insolación excesiva*. También se observa que apenas tiene impacto en el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia mayor de 3000 lux.

El indicador sobre el que tiene un mayor impacto es el de *Suficiencia de Iluminación Natural global*, y en sobre el porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente una iluminancia comprendida entre 500 y 3000 lux.

En un segundo orden de impacto se encuentran la *Suficiencia de Iluminación Natural difusa y mantenida* y el porcentaje del plano de trabajo con una iluminación natural entre 100 y 300 lux y entre 300 y 500 lux.

	<i>sUDI/med/ann</i>				Daylight Sufficiency			<i>SHGe</i>
	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	
00_ref	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
08_1x2	0.33	1.24	1.02	0.75	1.04	1.01	1.01	1.00
08_1x3	0.28	1.61	0.98	0.67	1.01	1.01	1.01	1.00
08_1x4	0.17	1.84	0.96	0.69	0.99	1.00	1.00	1.00
08_1x5	0.17	1.88	0.94	0.65	0.96	0.99	0.99	1.00
08_2x1	1.33	1.34	0.73	0.81	0.74	0.98	0.90	1.00
08_3x1	1.44	1.71	0.71	0.24	0.70	0.95	0.89	1.00
08_4x1	1.67	1.84	0.69	0.41	0.70	0.93	0.88	1.00
08_5x1	5.00	2.44	0.49	0.55	0.52	0.66	0.80	1.00
08_2x2	0.83	1.51	0.74	0.77	0.81	0.96	0.91	1.00
08_3x3	1.56	2.38	0.64	0.18	0.76	0.81	0.86	1.00
08_4x4	4.28	2.39	0.63	0.33	0.73	0.72	0.85	1.00
08_5x5	7.94	2.19	0.59	0.45	0.68	0.66	0.83	1.00

Tabla 82: Serie 8: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia

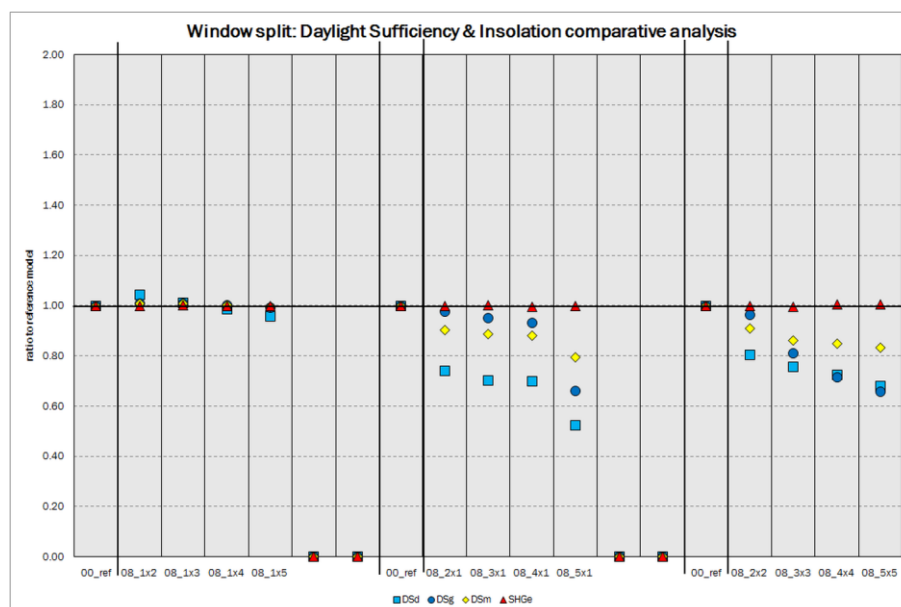


Figura 330: Variación de los indicadores *DSg*, *DSd*, *DSm* y *SHGe* respecto al modelo de referencia debido a la división del hueco. P.M. Esquivias

Tal como se puede observar en la Figura 330, la división del hueco en columnas, manteniendo la altura, no afecta a los indicadores, mientras que al dividir el hueco en filas, manteniendo la anchura, y la división creando una matriz de huecos, al modificar la altura en la que se disponen los huecos, produce la reducción de los valores de los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural*.

Esta reducción parece ser más progresiva en el caso de la matriz de huecos, tal como se aprecia en la gráfica, mediante curvas de forma parabólica de los indicadores, mientras que la división en filas produce un primer escalón de reducción, que se mantiene en los tres primeros modelos, y una reducción final para el último modelo de división horizontal del hueco.

En ningún caso se ve afectado el indicador *SHGe*, que depende de la superficie acristalada expuesta a la radiación solar.

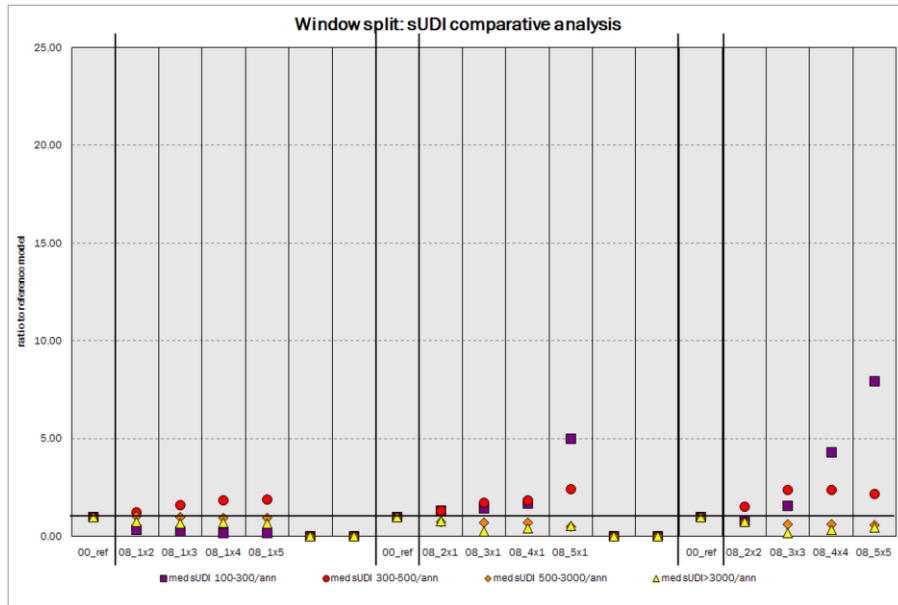


Figura 331: Variación del conjunto de indicadores *sUDI* respecto al modelo de referencia debido a la división del hueco. *P.M. Esquivias*

En el caso de los indicadores *sUDI*, se observa que la división del hueco produce mejoras en el rango de iluminancias de 300 a 500 lux en todos los modelos. Sin embargo, cuando se divide horizontalmente el hueco, sólo o en combinación con la división vertical, se reduce el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 500 y 3000 lux, aumentando también el porcentaje con una iluminancia entre 100 y 300 lux, aunque no en la misma cuantía. Asimismo, se observa una cierta reducción de iluminancia excesiva en estos dos grupos de modelos.

Para analizar la evolución mensual de los indicadores se muestran los indicadores *DSg* y *sUDI*<sub>500-3000</sub> lux.

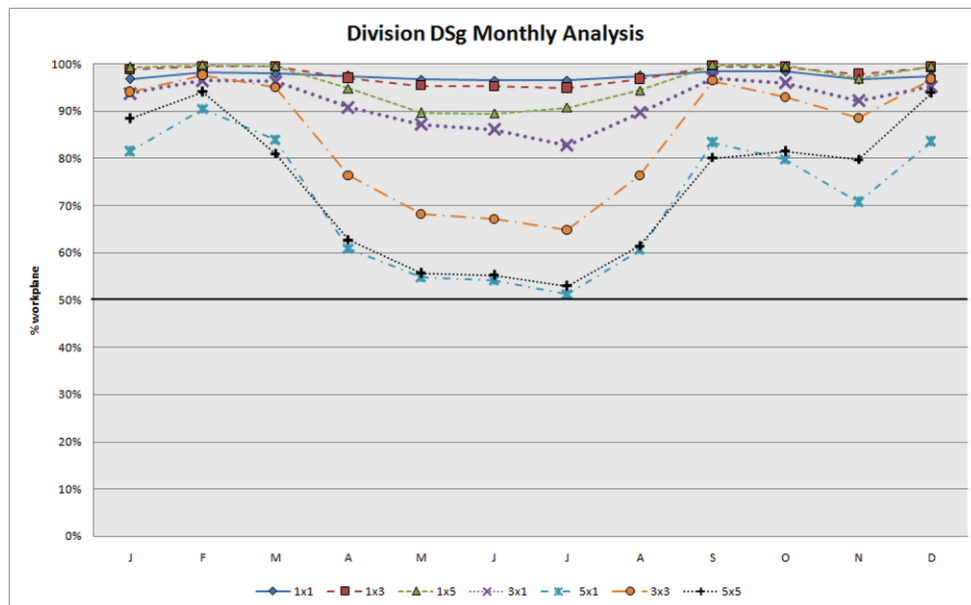


Figura 332: Valores mensuales de *DSg* en función de la división del hueco. *P.M. Esquivias*

En la Figura 332 se observa que la división vertical del hueco produce un ligero descenso de los valores en el periodo estival, con pocas diferencias entre las curvas. Sin embargo, la división horizontal o en matriz del hueco proporciona mayores variaciones, aunque manteniendo cierta

similitud. Se puede apreciar cómo las curvas para los modelos 5x1 y 5x5 son prácticamente iguales desde Marzo a Septiembre, siendo menores los valores para el modelo 5x1 durante el invierno.

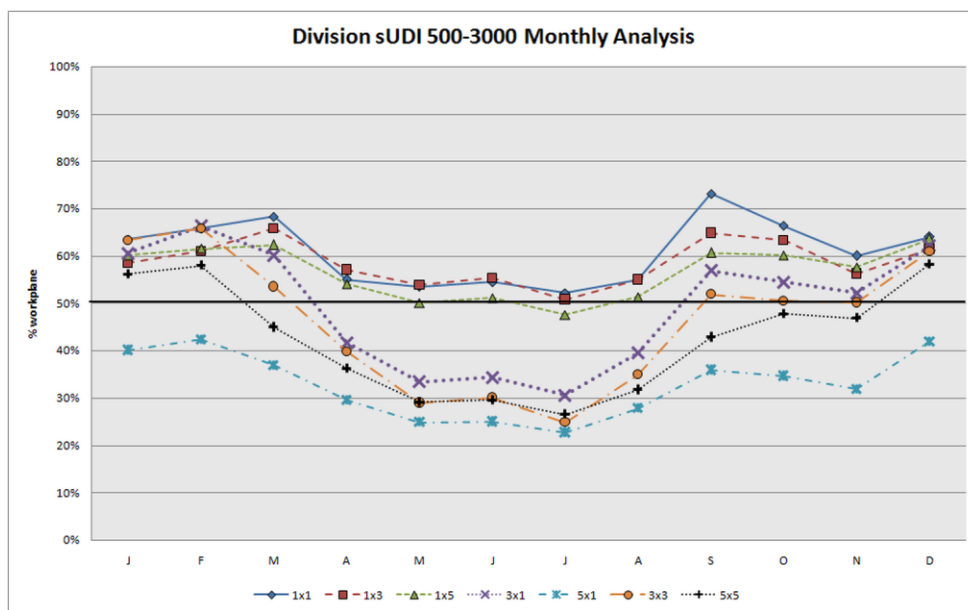


Figura 333: Valores mensuales de *sUDI* 500-3000 en función de la división del hueco. P.M. Esquivias

Similar comportamiento puede observarse respecto al indicador *sUDI*<sub>500-3000</sub>: la división vertical del hueco matiza las condiciones originales, suavizando la curva alrededor de los equinoccios, pero con pocas diferencias cuantitativas entre las diferentes curvas. La división horizontal o en matriz produce mayores reducciones de los valores, especialmente durante el periodo estival. Se aprecia que las curvas correspondientes a la matriz se encuentran entre las curvas correspondientes a la división horizontal del hueco, aunque casi todas mantienen la misma forma y valores similares. El modelo 5x1 es el que presenta una mayor reducción de los valores a lo largo de todo el año, reduciendo la disponibilidad de iluminancia entre 500 y 3000 lux de forma global.

Si atendemos a las «fichas síntesis-análisis», se observa que, aunque los valores anuales son parecidos al modelo de referencia, la división del hueco redundante en una mayor uniformidad en la distribución de la radiación solar sobre el plano de trabajo, reduciendo, por tanto, la aparición de grandes manchas solares que puedan causar deslumbramiento.

En este sentido, los resultados de la distribución de isóneas de *Factor de Iluminación Natural* coinciden con los resultados aportados por el proyecto '*Daylight Design Variations Book*' [303], donde se observa que el resultado de la división de la ventana da lugar a un primer conjunto de isóneas con centro en cada una de las ventanas que se unen formando isóneas envolventes a las ventanas a partir del primer tercio de la profundidad del espacio. De hecho, a medida que aumenta el número de ventana, su comportamiento se asimila a las ventanas horizontales provocando isóneas paralelas a la fachada acristalada.

También se observa también que la división de los huecos y su proximidad al plano de trabajo afectan notablemente a la uniformidad de la iluminación natural del espacio. De esta forma, aquellos modelos en los que, como resultado de la división del hueco, existe superficie de hueco cerca del plano de trabajo, decrece drásticamente la uniformidad, sin embargo, se ve matizada por la división en columnas, reduciendo la probabilidad de aparición de deslumbramiento.

#### 4.4.1.6 Distribución de los huecos

Se propone, por tanto, manteniendo la superficie de acristalamiento, el factor de forma y la posición centralizada de la ventana en el paramento, dividir dicha superficie y distribuir las partes resultantes en diferentes paramentos verticales, conservando siempre una porción en la fachada original [Figura 334], dando lugar a 8 situaciones distintas, tal como se muestra en la Tabla 83.

Nº	Nº ventanas	Forma	Alto (m)	Dist. Límites (m)	Orientación fachadas	Nombre
1	1	1.00	0.950	1.03	Sur(180°)	1_S
2	2	1.00	0.475	1.26	Norte (0°)-Sur (180°)	2_NS
3	2	1.00	0.475	1.26	Este (90°)-Sur (180°)	2_ES
4	2	1.00	0.475	1.26	Sur(180°)-Oeste(270°)	2_SO
5	3	1.00	0.317	1.34	Este (90°)-Sur(180°)-Oeste(270°)	3_ESO
6	3	1.00	0.317	1.34	Norte (0°)-Este(90°)-Sur(180°)	3_NES
7	3	1.00	0.317	1.34	Norte (0°)-Sur(180°)-Oeste(270°)	3_NSO
8	4	1.00	0.238	1.38	Norte(0°)-Este(90°)-Sur(180°)-Oeste(270°)	4_NESO

Tabla 83: Distribución de ventanas en diferentes paramentos.

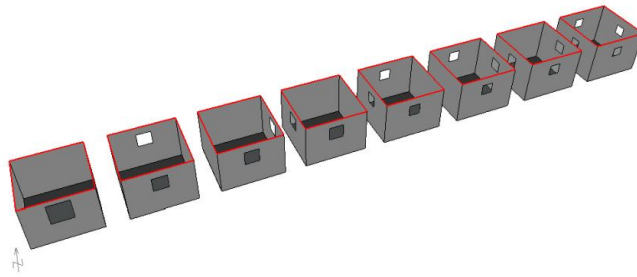


Figura 334: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie "Distribución" en Ecotect. De izquierda a derecha: modelos 1\_S, 2\_NS, 2\_ES, 2\_SO, 3\_NSO, 3\_NES, 3\_ESO y 4\_NESO. P.M. Esquivias

El impacto de la distribución homogénea de la superficie de hueco en diferentes paramentos sobre los indicadores anuales de iluminación natural e insolación se muestran en la Figura 335, cuyos valores se muestran en la Tabla 84.

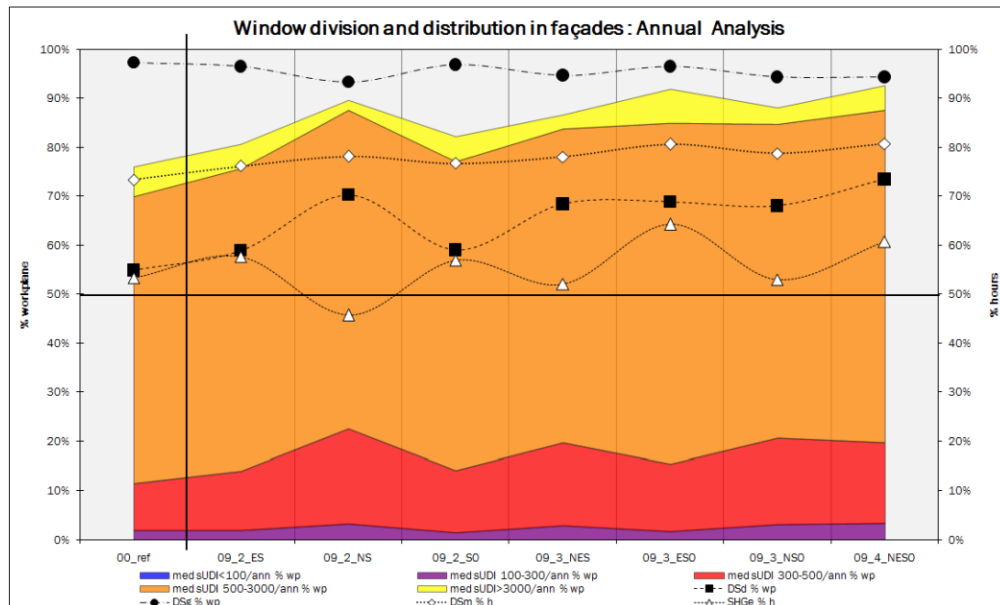


Figura 335: Serie 9: Distribución de los huecos. Indicadores anuales

Al distribuir la superficie de hueco en dos paramentos diferentes, manteniendo una parte en la fachada orientada al Sur, se observa que los modelos con superficie al Este u Oeste muestran una mayor *Suficiencia de Iluminación Natural global (DSg)* que el modelo con superficie al Norte. El mismo comportamiento, pero más acentuado presenta el indicador *insolación excesiva (SHGe)*, donde se penaliza mucho la ubicación de la mitad de la superficie de hueco al Norte.

Este comportamiento es inverso cuando el indicador es *Suficiencia de Iluminación Natural difusa y mantenida (DSd y DSm)*. En el caso de *DSd*, la diferencia es mayor y en el caso de *DSm*, la diferencia es apenas apreciable. Se observa que, en general, los modelos orientados al Sur y al Este u Oeste presentan comportamientos similares en la globalidad anual, diferente del modelo orientado al Norte.

Respecto a los indicadores de *Iluminancia Natural Útil Simultánea (sUDI)* se mantienen los mismos comportamientos: los valores de los modelos orientados al Sur y al Este u Oeste presentan menores porcentajes en el rango comprendido entre 100 y 3000 lux y valores mayores cuando se superan los 3000 lux, denotando la mayor propensión de los modelos a la entrada de radiación solar directa, tal como muestra el indicador *SHGe*. En este sentido, con la menor *SHGe* se obtiene una iluminancia excesiva simbólica.

	<i>sUDI</i> med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	<i>SHGe</i>
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
00_ref	0,00%	2,14%	9,51%	58,50%	6,06%	54,93%	97,38%	73,48%	53,43%
09_2_ES	0,00%	2,14%	12,01%	61,71%	4,99%	58,98%	96,55%	76,25%	57,72%
09_2_NS	0,00%	3,45%	19,26%	65,04%	2,02%	70,39%	93,46%	78,22%	45,78%
09_2_SO	0,00%	1,66%	12,60%	63,02%	5,11%	59,10%	96,91%	76,79%	57,01%
09_3_NES	0,00%	3,09%	16,77%	64,09%	2,85%	68,49%	94,77%	78,13%	52,10%
09_3_ESO	0,00%	1,90%	13,67%	69,56%	6,90%	68,97%	96,55%	80,72%	64,34%
09_3_NSO	0,00%	3,33%	17,48%	64,09%	3,33%	68,13%	94,41%	78,86%	53,04%
09_4_NESO	0,00%	3,57%	16,29%	67,90%	4,99%	73,48%	94,41%	80,87%	60,77%

Tabla 84: Serie 9: Distribución de los huecos. Indicadores anuales

Al distribuir la superficie de hueco en tres paramentos diferentes, manteniendo una porción en la fachada orientada al Sur, se alcanzan valores anuales homogéneos de *DSg*, *DSd* y *DSm*. Sin embargo, los valores de *SHGe* presentan un valor mayor en el modelo que no tiene superficie de hueco orientada al Norte. Es decir, en los otros dos modelos, al tener una porción de superficie orientada al Norte no recibe radiación solar directa. No obstante, esta diferencia es apenas notable, a escala anual, en la variación de los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural*.

En cuanto a la iluminancia útil, la distribución de la superficie de hueco al Este, Sur y Oeste, difiere de los otros modelos presentando comportamiento inverso. Éste presenta los menores valores de su conjunto en un rango de iluminancia comprendido entre 100 y 500 lux, siendo máximos de serie los valores de *sUDI<sub>500-3000</sub>* y *sUDI<sub>>3000</sub>*. Es decir, que aunque no se refleje en los indicadores de Suficiencia de Iluminación Natural, la captación solar directa en este modelo proporciona mayores porcentajes con niveles de iluminación más altos.

Por último, al dividir el hueco y distribuirlo en sus cuatro fachadas se alcanza la máxima *DSd* y *DSm*; es decir, el modelo capta iluminación difusa del hemisferio celeste desde cuatro orientaciones, aumentando la contribución difusa de la iluminación natural del espacio; además, al contar con una contribución estable, la acción de la iluminación directa se amortigua, al mismo tiempo que se reduce, ya que la superficie de captación es menor, y se logra un mayor mantenimiento de las

condiciones de iluminación natural del modelo. En lo relativo a la iluminancia útil, este modelo presenta valores intermedios a los presentados en el conjunto anterior.

En general, se observa que la acción de dividir y distribuir la superficie del hueco en diferentes paramentos de fachada reduce levemente la *Suficiencia de Iluminación Natural global* mientras que aumentan los valores de *Suficiencia de Iluminación Natural difusa y mantenida*, sin embargo no se puede dilucidar un comportamiento global de la *Insolación excesiva*.

Este comportamiento concuerda en lo visto en el estado del arte [4] [95] [253] en cuanto a que se indica que generalmente la misma superficie de ventana, distribuida en varios paramentos redundante en una mayor distribución de la luz en el entorno, proporcionando aproximadamente los mismos niveles de iluminación que una única ventana.

Considerando la iluminancia natural útil simultánea suficiente, es decir, el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 3000 lux, se observa que la distribución del hueco en diversos paramentos produce ligeras mejoras de la cobertura del plano de trabajo con iluminancia natural útil para el desarrollo de tareas visuales de media y alta precisión.

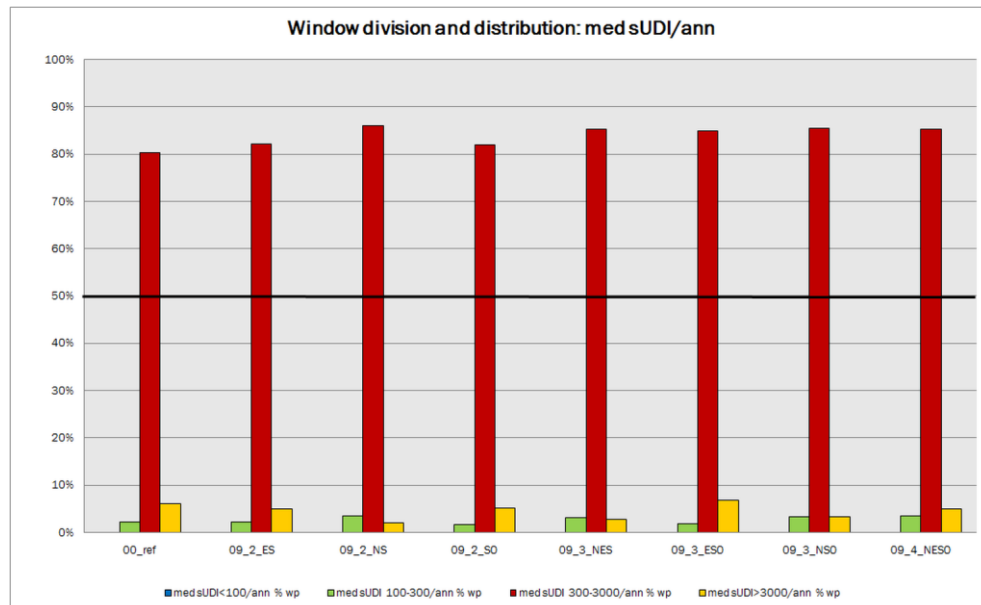


Figura 336: Distribución de la ventana. mediana anual sUDI. P.M. Esquivias

	sUDI med/ann				Daylight Sufficiency			SHGe
	100-300	300-500	500-3000	>3000	DSd	DSg	DSm	
00_ref	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
09_2_ES	1,00	1,26	1,05	0,82	1,07	0,99	1,04	1,08
09_2_NS	1,61	2,03	1,11	0,33	1,28	0,96	1,06	0,86
09_2_SO	0,78	1,32	1,08	0,84	1,08	1,00	1,05	1,07
09_3_NES	1,44	1,76	1,10	0,47	1,25	0,97	1,06	0,98
09_3_ESO	0,89	1,44	1,19	1,14	1,26	0,99	1,10	1,20
09_3_NSO	1,56	1,84	1,10	0,55	1,24	0,97	1,07	0,99
09_4_NESO	1,67	1,71	1,16	0,82	1,34	0,97	1,10	1,14

Tabla 85: Serie 9: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia

La distribución del hueco produce un ligero aumento mantenido de la superficie del plano de trabajo que se encuentra con una iluminancia comprendida entre 500 y 3000 lux. Los porcentajes del plano de trabajo entre 100 y 500 lux presentan comportamientos paralelos e inversos al

porcentaje por encima de 3000 lux, sin embargo el indicador sUDI300-500 presenta una mayor variación respecto del modelo de referencia y siempre presenta valores mayores que éste.

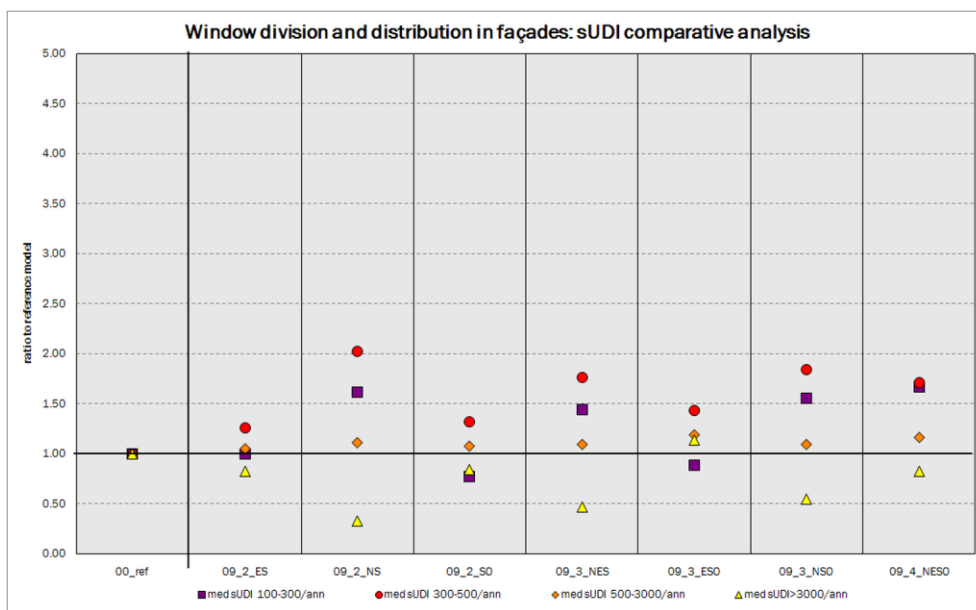


Figura 337: Variación del conjunto de indicadores *sUDI* respecto al modelo de referencia debido a la distribución de los huecos. *P.M. Esquivias*

En general, la distribución de la superficie del hueco redonda en una ligera mejora de la iluminancia que se obtiene en el plano de trabajo, especialmente para el desarrollo de tareas visuales de complejidad normal o alta.

La captación de radiación solar desde más diversas porciones de cielo, y de trayectoria solar, hace que aumente también la *Suficiencia de Iluminación Natural difusa*, así como el mantenimiento de las condiciones de iluminación y la *insolación excesiva*.

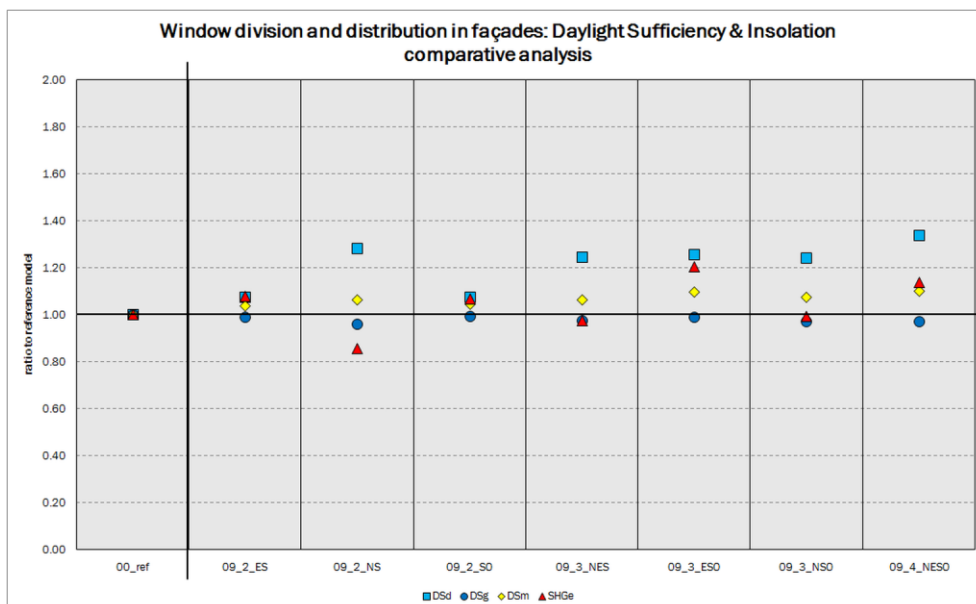


Figura 338: Variación de los indicadores *DSg*, *DSd*, *DSm* y *SHGe* respecto al modelo de referencia debido a la distribución de los huecos. *P.M. Esquivias*

Para analizar la evolución mensual de los indicadores se toman aquellos de mayor variación, que corresponden con *SHGe* y *sUDI<sub>500-3000</sub>lux*.



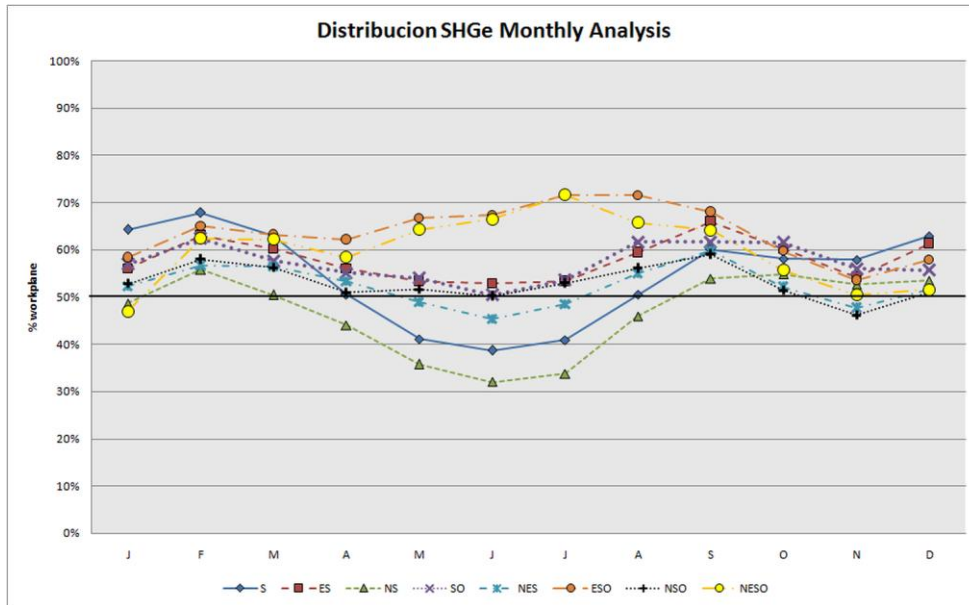


Figura 339: Valores mensuales de SHGe debido a la distribución del hueco. P.M. Esquivias

En general, casi todas las curvas presentan una forma cosenoidal, con máximo alrededor del solsticio de invierno y mínimo alrededor del solsticio de verano. Sin embargo, en los modelos que abarcan toda la trayectoria solar, modelos ESO y NESO, se observa un comportamiento diferente, siendo el máximo en torno al solsticio de verano y el mínimo en torno al solsticio de invierno, describiendo una curva en forma de campana.

En cualquier caso, los valores entre las curvas de cada uno de los grupos señalados presentan pequeñas diferencias, manteniendo entre ellas cierta similitud y paralelismo.

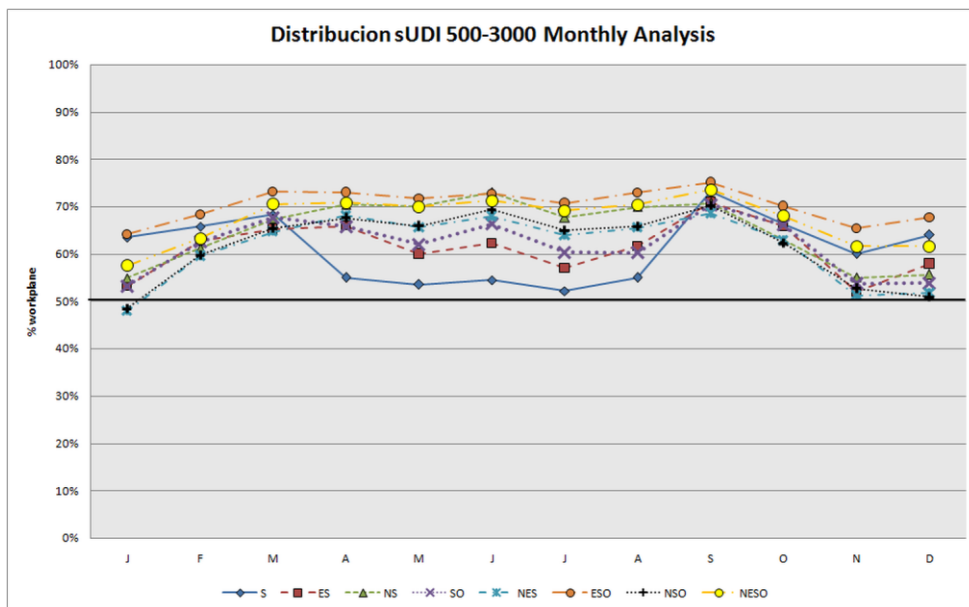


Figura 340: Valores mensuales de sUDI 500-3000 debido a la distribución del hueco. P.M. Esquivias

A medida que se capta la radiación solar desde porciones de cielo más diversos, las condiciones originales de iluminación natural se matizan y suavizan, reduciéndose las variaciones mensuales a lo largo del año.

Atendiendo a las «fichas síntesis-análisis», se observa que la distribución de la superficie de hueco en dos paramentos aumenta considerablemente la uniformidad de la iluminación natural y la

insolación del espacio, siendo ésta última de mayor cuantía cuando se capta radiación solar directa desde las orientaciones Sur y Oeste. Esta uniformidad aumenta cuando se distribuye en tres y cuatro paramentos.

En este sentido, los resultados de la distribución de isolíneas de *Factor de Iluminación Natural* coinciden con los resultados aportados por el proyecto '*Daylight Design Variations Book*' [303], donde se observa que el resultado de la distribución de la ventana da lugar a un primer conjunto de isolíneas con centro en cada una de las ventanas que se unen formando isolíneas envolventes a las ventanas.

#### 4.4.2 Elementos de control: las protecciones solares

Como ya se ha indicado, una excesiva iluminación natural provoca problemas de confort visual y de deslumbramiento a los usuarios; una excesiva ganancia solar representa una de las fuentes más importantes de sobrecalentamiento de los espacios, especialmente en verano [71] [10].

Estos problemas generalmente aparecen cuando se diseñan los espacios con grandes superficies de acristalamiento o inadecuadas para la orientación de la fachada que la contiene. A medida que aparecen estos problemas de disconfort lumínico y térmico se tiende a utilizar elementos de control, que reduzcan la entrada de radiación solar directa en el espacio y, en muchos casos, también la entrada de radiación solar difusa [9] [306].

Los elementos de protección solar pueden localizarse en el exterior, el interior o en las capas intermedias del sistema de acristalamiento. Frente a las interiores o intermedias, las protecciones solares exteriores permiten controlar la cantidad de radiación solar directa que entra en un espacio mediante el bloqueo de la radiación solar directa que incide en la ventana [320] [95].

Las protecciones solares fijas o móviles, pueden ser controladas manualmente o mediante un sistema de regulación. Las protecciones solares fijas, además, suelen definirse en el proyecto arquitectónico, formando parte de la imagen exterior del edificio, mientras que las protecciones solares móviles interiores son más susceptibles de ser incorporadas por el propietario del espacio.

La incorporación de las protecciones solares puede reducir el consumo energético de los sistemas térmicos, y también del sistema de iluminación artificial, pero un exceso de protección puede provocar el efecto contrario, aumentando el consumo energético del edificio. Si bien se sabe de los problemas derivados de una falta de protección solar, una excesiva protección dará lugar a una falta permanente de luz natural, por lo que se consumirá energía en iluminación artificial durante todas las horas del año; además, puede bloquear el acceso solar directo en invierno, dando lugar a un incremento en la demanda energética de calefacción, aumentando, por tanto, también su consumo de energía.

El principio de funcionamiento de las protecciones solares es la obstrucción de una determinada porción de la bóveda celeste, por la que, durante un determinado periodo anual, transita el Sol debido al movimiento rotacional y traslacional de la Tierra. En base a esta interposición se reduce la radiación solar, directa y difusa, que entra en el espacio modificando las condiciones ambientales interiores.

Tal como se apunta en el estado del arte: los elementos de protección solar fijos, colocados en el exterior del hueco, pueden reducir el incremento de las cargas térmicas mientras controlan la intensa luz natural del verano [332] [354], sin embargo en invierno también pueden bloquear una cantidad significativa de radiación solar, aumentando la demanda de calefacción e incluso la demanda de iluminación artificial [346], por lo que estos elementos requieren de un cuidadoso estudio para no obtener balances energéticos globales negativos [328].



### 4.4.2.1 Voladizo

Los voladizos son dispositivos de protección solar que se basan en la incorporación de un elemento plano horizontal sobre la ventana de forma que obstruye la parte superior de la bóveda celeste que «ve» la ventana, generalmente medida desde el alféizar.

Para la definición de las diferentes opciones de voladizos se define el ángulo de obstrucción, el cual determina la dimensión del ángulo de visión de cielo que es visible por el punto central del alféizar de la ventana, considerando el modelo exento. Según la geometría del recorrido solar en Sevilla, la mínima elevación del Sol a las 12 h solares es de  $29^{\circ}2'$ , por lo que se decide fijar como valor máximo de ángulo de obstrucción en  $60^{\circ}$  y se seleccionan valores múltiplos de  $15^{\circ}$ , dando lugar al resto de los casos de estudio.

El ángulo de obstrucción ( $\alpha$ ), basándose en que el voladizo se coloca justo sobre el dintel de la ventana, determina la profundidad del voladizo (d) [Figura 211]. Como elementos constantes en la definición de los mismos se encuentran además de su ubicación, la anchura del voladizo que es igual a la de la ventana, y su coeficiente de reflexión que es de 50% [Tabla 86, Figura 341].

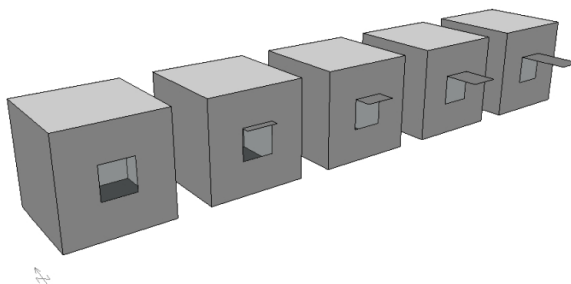


Figura 341: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Voladizo” en *Ecotect*. De izquierda a derecha: ángulo de obstrucción de  $0^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  y  $60^{\circ}$ . P.M. Esquivias

Nº	Ángulo de obstrucción ( $^{\circ}$ )	Ángulo de elevación visible ( $^{\circ}$ )	Rango visible ( $^{\circ}$ )	Profundidad (m)
1	$0^{\circ}$	$90^{\circ}$	$0^{\circ}$ a $90^{\circ}$	0.00
2	$15^{\circ}$	$75^{\circ}$	$0^{\circ}$ a $75^{\circ}$	0.25
3	$30^{\circ}$	$60^{\circ}$	$0^{\circ}$ a $60^{\circ}$	0.55
4	$45^{\circ}$	$45^{\circ}$	$0^{\circ}$ a $45^{\circ}$	0.95
5	$60^{\circ}$	$30^{\circ}$	$0^{\circ}$ a $30^{\circ}$	1.65

Tabla 86: Valores de Ángulo de obstrucción del voladizo y su profundidad

El impacto de la incorporación de un voladizo de anchura igual a la ventana y de profundidad en función del ángulo de obstrucción de la bóveda celeste se refleja en la Figura 342, cuyos valores se muestran en la Tabla 87.

Tal como se puede apreciar, la incorporación de un voladizo produce una reducción lineal de los indicadores *Suficiencia de Iluminación Natural global y mantenida (DSg y DSm)*, siendo ambos comportamientos prácticamente paralelos [Figura 342]. Sin embargo, los indicadores *Suficiencia de Iluminación Natural difusa (DSd)* e *Insolación excesiva (SHGe)* muestran un descenso logarítmico de sus valores, siendo también prácticamente paralelos.

Respecto a la *Iluminancia Natural Útil simultánea (sUDI)* se observa que la incorporación del voladizo redundará en un aumento de la superficie del plano de trabajo con una iluminación entre 100 y 500 lux, siendo mayor el incremento en el tramo comprendido con 300-500 lux. Este aumento conlleva principalmente el descenso del porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 500 y 3000 lux y en menor medida por encima de 3000 lux [Figura 344].

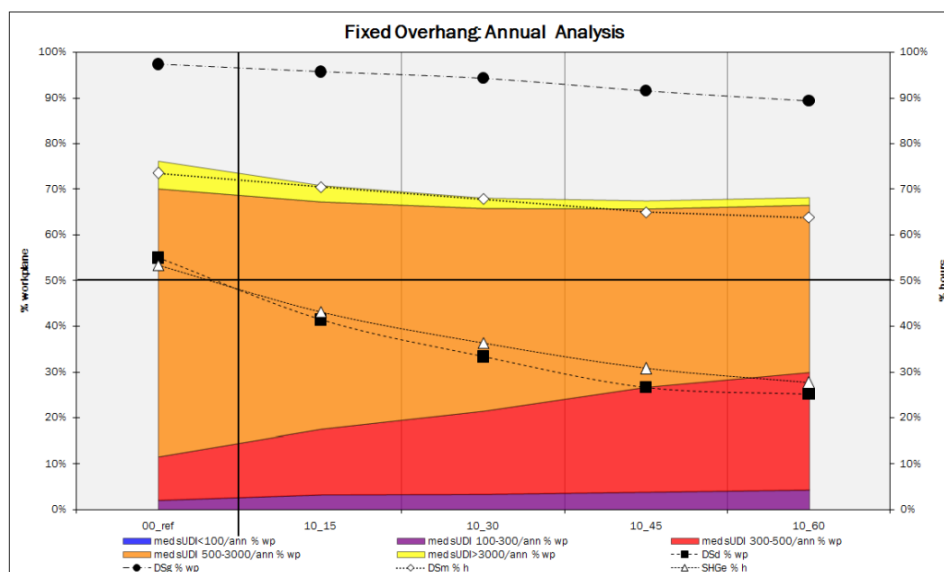


Figura 342: Serie 10: Voladizo. Indicadores anuales. P.M. Esquivias

A la vista de los resultados se observa que sólo el modelo de referencia cumpliría con el *criterio de Suficiente Luz Natural* mediante la componente difusa de la luz natural proveniente de la bóveda celeste, sin considerar la componente reflejada de la luz directa, ya que si observamos los valores de *DSg*, permanecen alrededor del 90%, denotando la importancia de la componente reflejada en estos casos. Así también se observa que la reducción de las horas de insolación no se corresponde linealmente con la reducción del área con mayor probabilidad de deslumbramiento.

	sUDI med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	DSd	DSg	DSm	SHGe
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
00_ref	0,00%	2,14%	9,51%	58,50%	6,06%	54,93%	97,38%	73,48%	53,43%
10_15	0,00%	3,33%	14,27%	49,70%	3,57%	41,38%	95,72%	70,45%	43,11%
10_30	0,00%	3,45%	18,07%	44,35%	2,26%	33,29%	94,29%	67,84%	36,28%
10_45	0,00%	3,92%	22,83%	39,00%	1,78%	26,63%	91,56%	64,94%	30,75%
10_60	0,00%	4,40%	25,56%	36,62%	1,66%	25,09%	89,42%	63,83%	27,59%

Tabla 87: Serie 10: Voladizo. Indicadores anuales

En general, la presencia de un voladizo reduce la Suficiencia de Iluminación Natural y de Insolación excesiva del espacio, reduciendo también el porcentaje del plano de trabajo que alcanza una iluminancia simultánea mayor de 500 lux.

La reducción de la intensidad de la iluminancia captada por el hueco se traduce en un aumento en la porción del plano de trabajo que alcanza una iluminancia simultánea entre 100 y 500 lux.

Así también, la reducción del *SHGe* redundaría en una reducción de *sUDI*<sub>>3000</sub>, aunque no de forma tan señalada como se aprecia en las otras series de estudio.

Considerando la iluminancia natural útil simultánea suficiente, es decir, el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 3000 lux, se observa que la incorporación de un voladizo apenas tiene repercusión sobre la cobertura del plano de trabajo con una iluminancia natural útil simultánea adecuada para el desarrollo de tareas visuales de media y alta precisión.

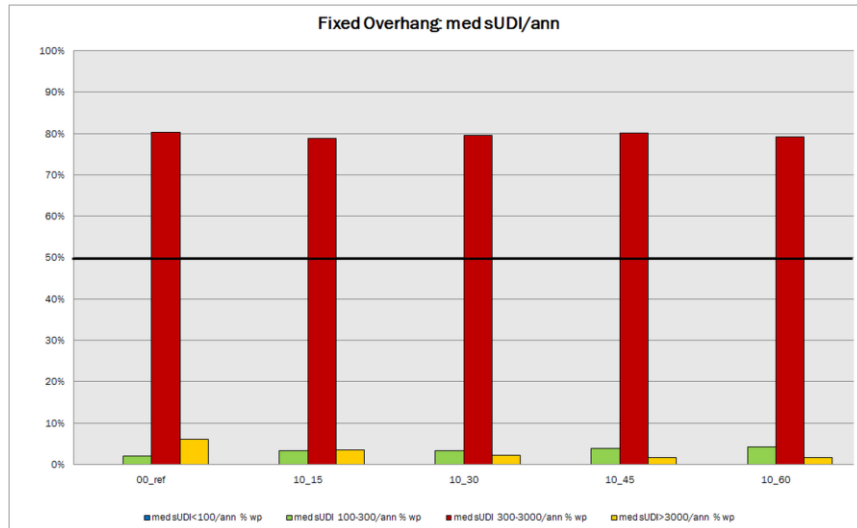


Figura 343: Voladizo. mediana anual *sUDI*. P.M. Esquivias

	<i>sUDI</i> med/ann				Daylight Sufficiency			SHGe
	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	
00_ref	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10_15	1.56	1.50	0.85	0.59	0.75	0.98	0.96	1.56
10_30	1.61	1.90	0.76	0.37	0.61	0.97	0.92	1.61
10_45	1.83	2.40	0.67	0.29	0.48	0.94	0.88	1.83
10_60	2.06	2.69	0.63	0.27	0.46	0.92	0.87	2.06

Tabla 88: Serie 9: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia

La incorporación de un voladizo se traduce en un incremento progresivo del porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 500 lux, y un aumento del porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 100 y 300 lux.

La principal reducción se encuentra en el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia mayor de 3000 lux y en menor medida en el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 500 y 3000 lux. De hecho, los resultados muestran que la incorporación de un voladizo no llega a eliminar en su totalidad la iluminancia excesiva, que sería el objetivo último.

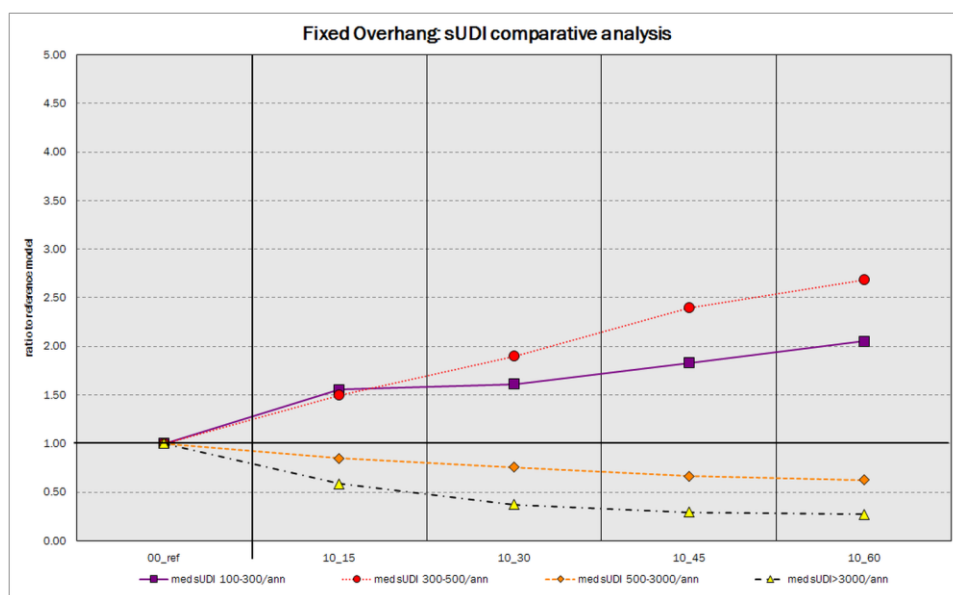


Figura 344: Variación del conjunto de indicadores *sUDI* respecto al modelo de referencia debido a la presencia de un voladizo. P.M. Esquivias

Asimismo, la presencia de un voladizo reduce de forma progresiva los valores anuales de todos los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural* y de *Insolación Excesiva*. En este sentido, se distinguen dos grupos. Por un lado los valores *DSg* y *DSm* se reducen cerca del 10% las condiciones iniciales mientras los valores de *DSd* y *SHGe* se reducen alrededor del 50%, sin llegar a eliminar la *insolación excesiva* en el espacio.

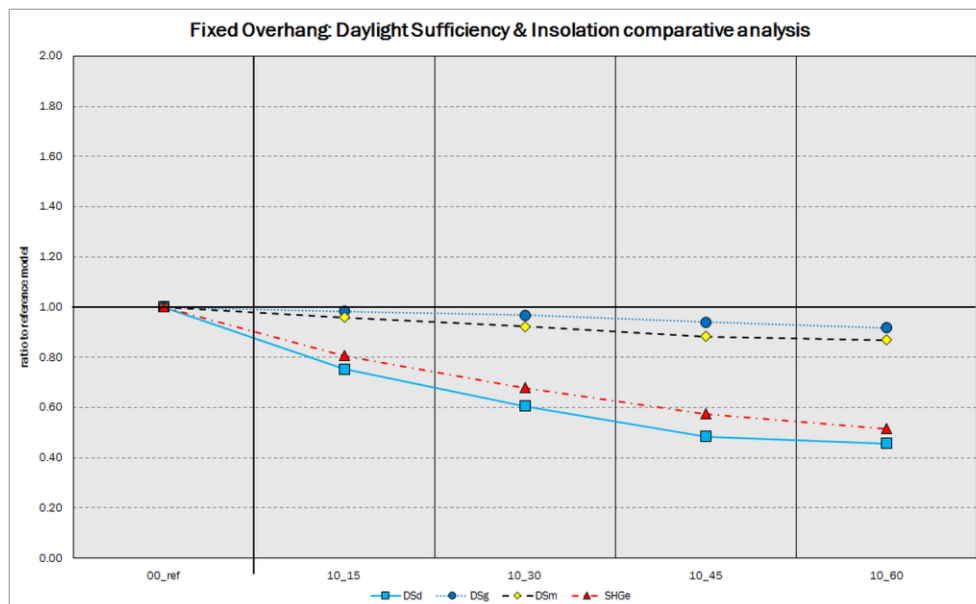


Figura 345: Variación de los indicadores *DSg*, *DSd*, *DSm* y *SHGe* respecto al modelo de referencia debido a la presencia de un voladizo. P.M. Esquivias

Para mostrar la evolución mensual de los indicadores se aportan las gráficas de los indicadores *SHGe* y *sUDI<sub>500-3000</sub>*. La incorporación del voladizo supone la reducción de *SHGe* especialmente durante los meses estivales. Tras una primera gran reducción que corresponde con una obstrucción de 15°, las demás curvas presentan aproximadamente el mismo comportamiento, con pequeñas diferencias cuantitativas, especialmente hasta septiembre.

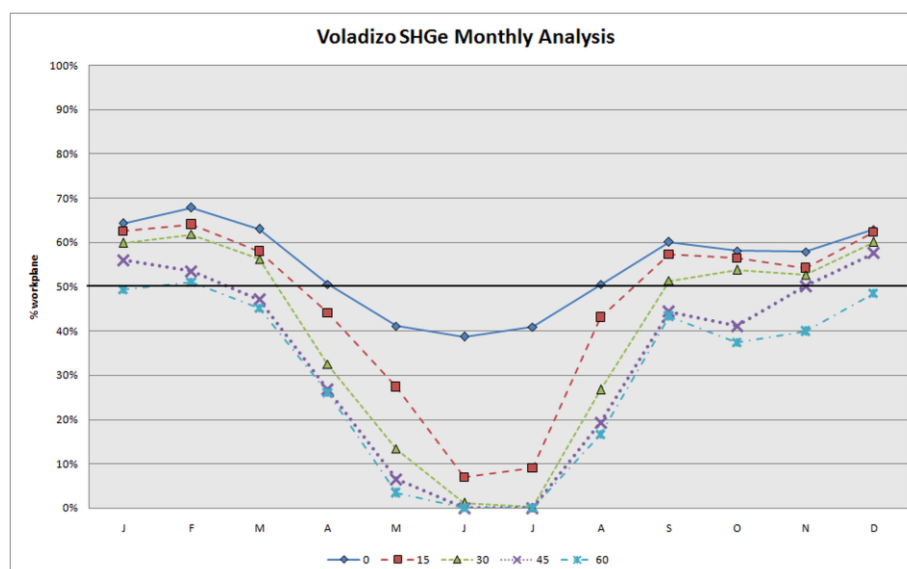


Figura 346: Valores mensuales de *SHGe* debido a la presencia de un voladizo. P.M. Esquivias

Así también, la incorporación de un voladizo supone la matización de las condiciones originales de iluminación natural, especialmente alrededor de los equinoccios. A medida que aumenta el



ángulo de obstrucción del voladizo se reduce progresivamente el valor del indicador  $sUDI_{500-3000}$ , suavizando las curvas.

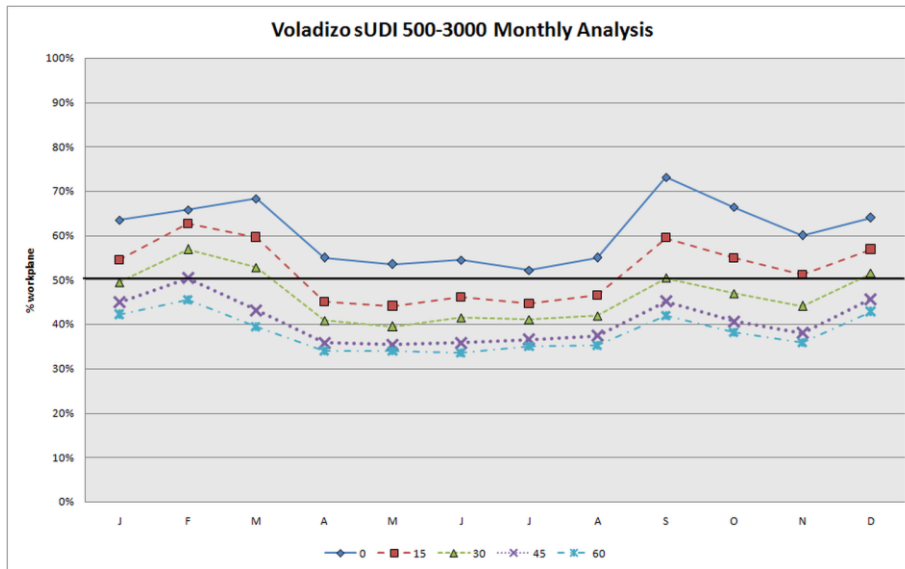


Figura 347: Variación de los indicadores  $DSg$ ,  $DSd$ ,  $DSm$  y  $SHGe$  respecto al modelo de referencia debido a la presencia de un voladizo. P.M. Esquivias

Mientras diversos estudios recomiendan la incorporación de voladizos con una profundidad igual a la altura de la ventana [327] [340], los resultados obtenidos no proporcionan argumentos suficientes como para recomendar el modelo con un ángulo de obstrucción de 45° frente a los demás.



#### 4.4.2.2 Saliente lateral

Los salientes laterales permiten bloquear la *radiación solar* del Sol cuando éste tiene una menor *elevación* ( $\gamma$ ). En la definición geométrica de los salientes laterales se considera el ángulo de obstrucción del mismo ( $\alpha$ ), medido desde la jamba de la ventana opuesta a la ubicación del saliente.

Una vez definido el ángulo de obstrucción del saliente lateral ( $\alpha$ ) se obtiene la amplitud del ángulo de azimut visible desde el punto opuesto del alféizar y la profundidad del saliente ( $d$ ) [Figura 213], considerando que el saliente se coloca en la jamba de la ventana, manteniendo una altura constante igual a la altura de la ventana y con un coeficiente de reflexión del 50%.

Al reducir su extensión a la altura de la ventana, ésta se ve expuesta a áreas de la bóveda celeste con una alta y baja elevación solar ( $\gamma$ ), por lo que los valores resultantes en este estudio serán mayores que con salientes de extensión infinita.

Para estudiar la obstrucción del saliente lateral se plantean los ángulos de obstrucción definidos para evaluar los voladizos ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ ) aplicados en el rango de valores de *azimut* negativo (Este) y en el rango de valores de *azimut* positivo (Oeste), partiendo de la no existencia de saliente lateral [Tabla 89].

Nº	Obstrucción ( $^\circ$ )	Ángulo de visión ( $^\circ$ )	Profundidad (m)	Hemisferio obstruido	Rango azimut visible
1	$60^\circ$	$120^\circ$	1.65	Este	$-30^\circ$ a $90^\circ$
2	$45^\circ$	$135^\circ$	0.95	Este	$-45^\circ$ a $90^\circ$
3	$30^\circ$	$150^\circ$	0.55	Este	$-60^\circ$ a $90^\circ$
4	$15^\circ$	$165^\circ$	0.25	Este	$-75^\circ$ a $90^\circ$
5	$0^\circ$	$180^\circ$	0.00	-	$-90^\circ$ a $90^\circ$
6	$15^\circ$	$165^\circ$	0.25	Oeste	$-90^\circ$ a $75^\circ$
7	$30^\circ$	$150^\circ$	0.55	Oeste	$-90^\circ$ a $60^\circ$
8	$45^\circ$	$135^\circ$	0.95	Oeste	$-90^\circ$ a $45^\circ$
9	$60^\circ$	$120^\circ$	1.65	Oeste	$-90^\circ$ a $30^\circ$

Tabla 89: Ángulo de obstrucción de los salientes y valores de los parámetros afectados

Esta determinación da lugar a que cuando se estudia el ángulo de obstrucción con azimut negativo el saliente se coloca en la jamba derecha de la ventana, y que cuando se estudia el ángulo de obstrucción con azimut positivo el saliente se coloca en la jamba izquierda de la ventana, vista ésta desde el exterior [Figura 348].

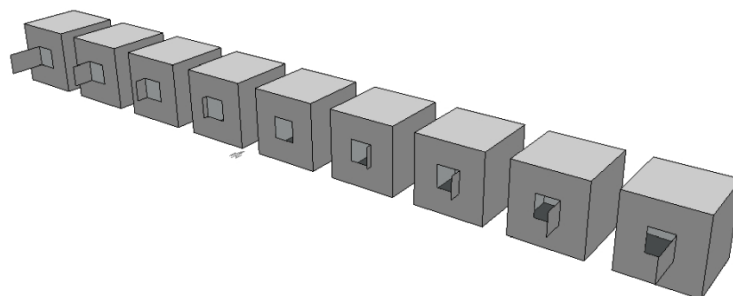


Figura 348: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie "Saliente lateral" en Ecotect. P.M. Esquivias.

La evolución de los indicadores anuales de iluminación natural e insolación debida a la incorporación de un saliente lateral ocupando la altura de la ventana se muestran en la Figura 349 y la Tabla 90.

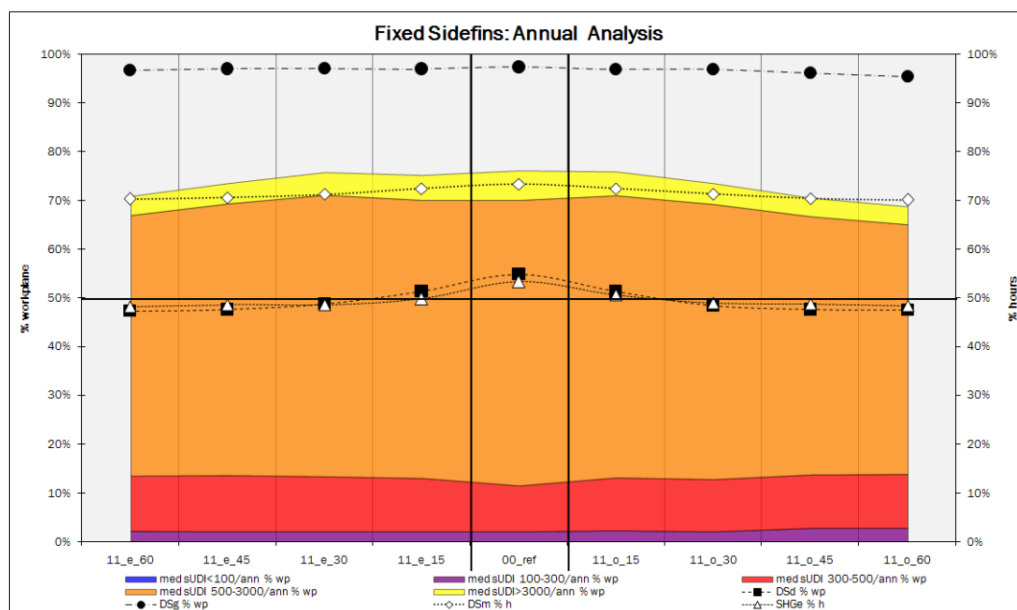


Figura 349: Serie 11: Saliente lateral. Indicadores anuales. P.M. Esquivias

En el caso de los salientes laterales, apenas existen diferencias cuantitativas entre las dos posiciones (protegiendo al este o al oeste). En ambos casos se produce una reducción suave de todos los indicadores.

En el caso de la *Suficiencia de Iluminación Natural global y mantenida (DSg y DSm)* los valores permanecen prácticamente constantes. Sin embargo tanto la *Suficiencia de Iluminación Natural difusa (DSd)* y la *Insolación excesiva (SHGe)* presentan un primer descenso lineal hasta alcanzar un ángulo de obstrucción de 30°, permaneciendo constantes con mayores ángulos de obstrucción.

Se puede entender, por tanto, que el ángulo de obstrucción de 30° es el ángulo de saturación o ángulo límite para el caso estudiado. Aunque se debe señalar que con una obstrucción mayor de 15° no se cumple con el *criterio de Suficiente Luz Natural*.

	sUDI/med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	DSd	DSg	DSm	SHGe
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
11_e_60	0,00%	2,26%	11,41%	53,39%	3,92%	47,44%	96,79%	70,42%	48,32%
11_e_45	0,00%	2,14%	11,65%	55,65%	4,16%	47,68%	97,03%	70,72%	48,71%
11_e_30	0,00%	2,14%	11,41%	57,67%	4,64%	48,87%	97,15%	71,39%	48,64%
11_e_15	0,00%	2,14%	11,06%	56,96%	5,11%	51,49%	97,03%	72,58%	49,88%
00_ref	0,00%	2,14%	9,51%	58,50%	6,06%	54,93%	97,38%	73,48%	53,43%
11_o_15	0,00%	2,38%	10,94%	57,79%	4,88%	51,37%	96,91%	72,54%	50,76%
11_o_30	0,00%	2,14%	10,82%	56,36%	4,28%	48,51%	96,91%	71,41%	49,11%
11_o_45	0,00%	2,85%	11,06%	52,91%	3,80%	47,68%	96,20%	70,49%	48,84%
11_o_60	0,00%	2,85%	11,18%	51,13%	3,69%	47,56%	95,48%	70,21%	48,56%

Tabla 90: Serie 11: Saliente lateral. Indicadores anuales

En ambos casos se aprecia que la presencia de un elemento de protección vertical apenas tiene incidencia en la distribución anual de los rangos de iluminancia en el plano de trabajo. Se observan ligeras variaciones en los tres rangos superiores que no son de relevancia para la evaluación global de las condiciones de iluminación natural.

Considerando la iluminancia natural útil simultánea suficiente, es decir, el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 3000 lux, se observa que la incorporación de un

saliente lateral apenas tiene repercusión sobre la cobertura del plano de trabajo con una iluminancia natural útil simultánea adecuada para el desarrollo de tareas visuales de media y alta precisión.

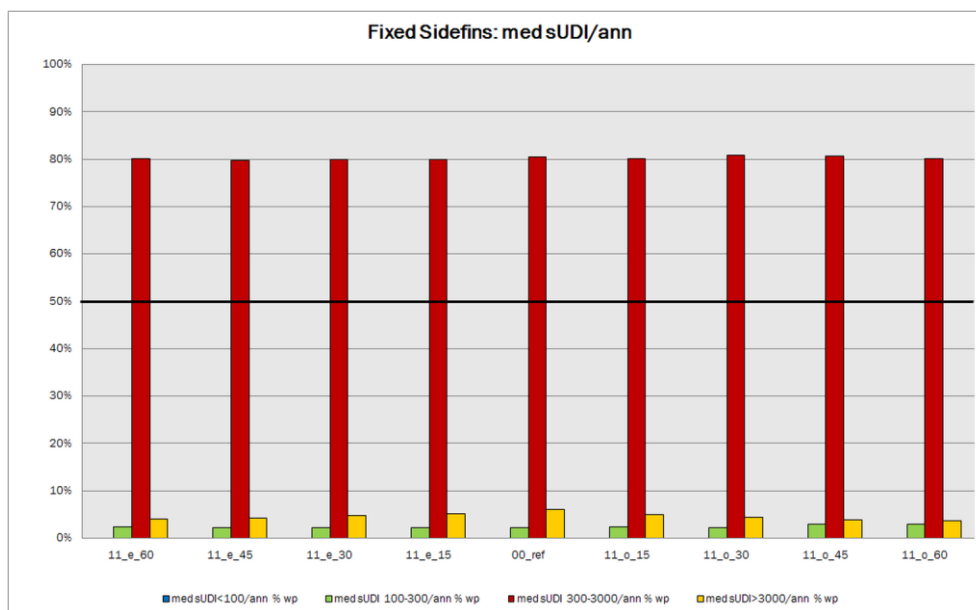


Figura 350: Saliente lateral. mediana anual sUDI. P.M. Esquivias

La relación proporcional de los diferentes modelos respecto al modelo de referencia corrobora estas afirmaciones. La presencia de salientes laterales en un modelo orientado al Sur, apenas tiene repercusión en ninguno de los indicadores, por lo que debe estudiarse en otras orientaciones para poder proporcionar un mejor juicio valorativo y encontrar la idoneidad de su aplicación.

	sUDI/med/ann				Daylight Sufficiency			SHGe
	100-300	300-500	500-3000	>3000	DSd	DSg	DSm	
11_e_60	1.06	1.20	0.91	0.65	0.86	0.99	0.96	0.90
11_e_45	1.00	1.23	0.95	0.69	0.87	1.00	0.96	0.91
11_e_30	1.00	1.20	0.99	0.77	0.89	1.00	0.97	0.91
11_e_15	1.00	1.16	0.97	0.84	0.94	1.00	0.99	0.93
00_ref	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
11_o_15	1.11	1.15	0.99	0.81	0.94	1.00	0.99	0.95
11_o_30	1.00	1.14	0.96	0.71	0.88	1.00	0.97	0.92
11_o_45	1.33	1.16	0.90	0.63	0.87	0.99	0.96	0.91
11_o_60	1.33	1.18	0.87	0.61	0.87	0.98	0.96	0.91

Tabla 91: Serie 9: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia

La presencia de salientes laterales en una fachada orientada al Sur provoca una ligera reducción del porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 500 y 3000 lux, así como con una iluminancia mayor de 3000 lux, tanto si se disponen a un lado como al otro lado del hueco, presentando una evolución simétrica.

Esta reducción se traduce en un ligero aumento de las condiciones de iluminación natural para el desarrollo de tareas visuales de baja y media precisión. El aumento es apenas apreciable en la evaluación global de las condiciones de iluminación natural.

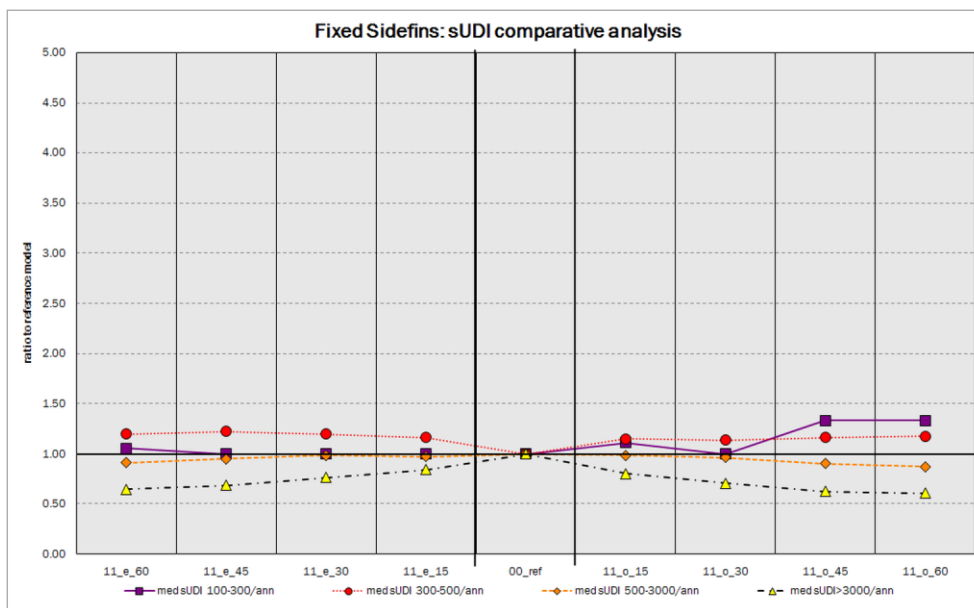


Figura 351: Variación del conjunto de indicadores *sUDI* respecto al modelo de referencia debido a la presencia de salientes laterales. P.M. Esquivias

En general se aprecia una ligera reducción de los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural* y de *Insolación Excesiva*, pero estas reducciones tampoco son de gran entidad. La mayor reducción de la contribución difusa puede deberse a la obstrucción de porción de cielo que supone la presencia del saliente lateral en el modelo.

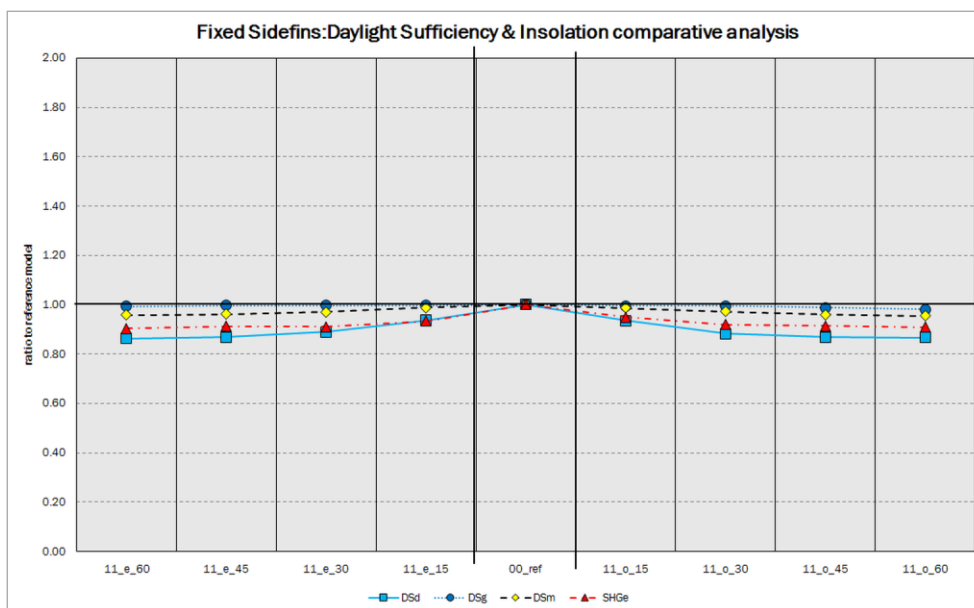


Figura 352: Variación de los indicadores *DSg*, *DSd*, *DSm* y *SHGe* respecto al modelo de referencia debido a la presencia de salientes laterales. P.M. Esquivias

Siendo el objetivo de incorporar elementos de protección solar la reducción de la *insolación excesiva* se muestra la evolución mensual de este indicador donde se puede observar que las curvas son muy similares a las condiciones originales de insolación.

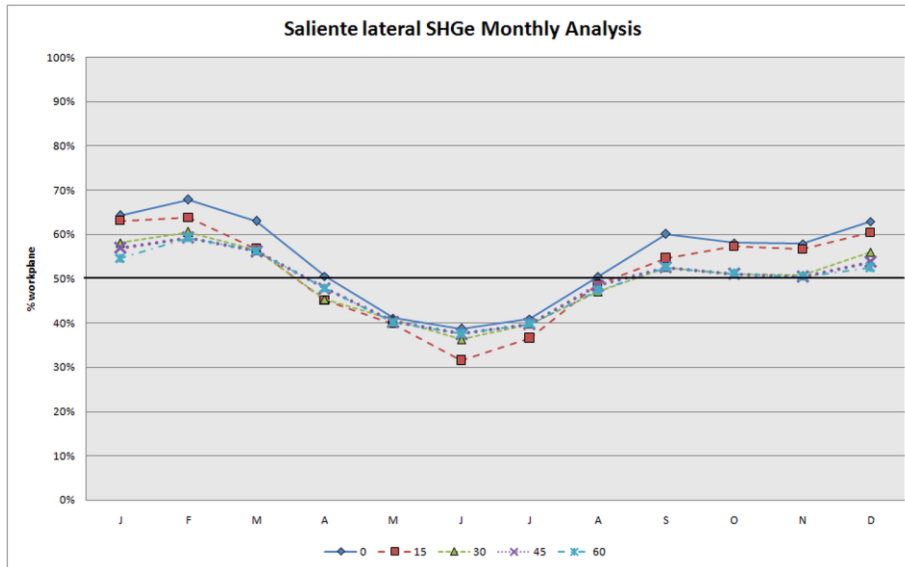


Figura 353: Valores mensuales de SHGe debido a la presencia de saliente lateral. P.M. Esquivias

Tal como se desprende del estado del arte, y se constata mediante los resultados, en las fachadas orientadas al Sur, como es este caso, los salientes laterales resultan muy poco eficientes, por mucho que se aumente su profundidad, tal como señala Wong y Li [352]. Se corroboran, por tanto, los resultados obtenidos por Esquivias [64] [119] en cuanto a que los salientes verticales apenas afectan a las condiciones de iluminación natural en fachadas orientadas al Sur.

Sin embargo, los estudios señalan que son más eficientes en las fachadas orientadas al Norte, Este y Oeste, cuestión que habrá que comprobar mediante el desarrollo de nuevos modelos. En el caso de la protección solar, no es posible aplicar factores de minoración porque depende de la geometría solar afectando a la disponibilidad de iluminación natural e insolación interior.





### 4.4.2.3 Dispositivos de lamas fijas

Los dispositivos de lamas fijas de estudio son el conjunto de elementos fijos que se colocan en el exterior del hueco, generalmente compuesto por elementos iguales distribuidos equitativamente sobre una superficie, pudiendo ser elementos horizontales, verticales o formando una retícula combinando elementos verticales y horizontales. En todos los casos, las dimensiones de los elementos se igualan a las dimensiones de la ventana, se mantiene una profundidad de los elementos de 0'10 m, no se separan del plano de la ventana y el coeficiente de reflexión es de 50%.

En el caso de las lamas horizontales, considerando el modelo exento y que el rango máximo del *ángulo de elevación* ( $\gamma$ ) de la bóveda celeste visible es de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , se define el ángulo de obstrucción exactamente igual que con los voladizos, debido a la relación geométrica que guardan los elementos. El ángulo de obstrucción ( $\alpha$ ) de las lamas horizontales se mide desde el centro de la lama horizontal inferior, ya que ésta se convierte en el nuevo plano del horizonte, representando el ángulo de elevación  $0^\circ$ .

A la hora de distribuir las lamas siempre se parte del dintel de la ventana, sin incorporar ningún elemento por debajo del alféizar de la misma, ya que el funcionamiento de las lamas horizontales se basa en la obstrucción de la parte superior de la bóveda celeste. En este caso se considera que la pérdida del posible aporte por reflexión sobre la lama inferior es despreciable [Figura 354].

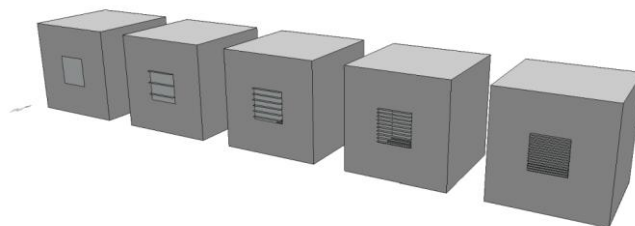


Figura 354: Representación gráfica de los modelos de lamas horizontales de la serie "Lamas Fijas" en *Ecotect*. P.M. Esquivias

El ángulo de obstrucción de las lamas verticales se mide desde el punto opuesto a la lama, tal como se define el ángulo de obstrucción de los salientes laterales, sin embargo el rango de *azimut* de bóveda celeste visible por la ventana difiere al visible cuando se incorpora un saliente. La presencia de las lamas verticales hace que sólo entre luz solar directa en el rango de *azimut* no obstruido por las lamas, tanto al Este como al Oeste, considerando la fachada orientada al Sur.

En el caso de las lamas verticales, su distribución se realiza respecto al centro de la ventana, finalizando con la primera lama que sobrepasa la anchura de la ventana, ya que en este caso, todas las lamas representan un obstáculo del ángulo de *azimut* visible [Figura 355].

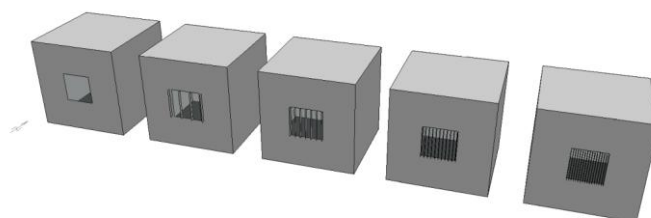


Figura 355: Representación gráfica de los modelos de lamas verticales de la serie "Lamas Fijas" en *Ecotect*. P.M. Esquivias

Por último, la presencia de elementos verticales y horizontales fijos formando una retícula se traduce en la combinación geométrica de los parámetros definidos para las lamas horizontales y las

lamas verticales, afectando por tanto, simultáneamente al rango de ángulo de *elevación* ( $\gamma$ ) y de *azimut* ( $\alpha$ ) visible de la bóveda celeste. En este caso, aunque la distribución de los elementos horizontales comienza desde el dintel de la ventana, se cierra el número de lamas con la primera lama que se coloca por debajo del alféizar [Figura 356].

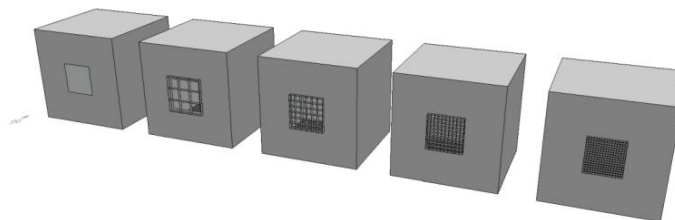


Figura 356: Representación gráfica de los modelos de retícula de la serie "Lamas Fijas" en Ecotect. P.M. Esquivias

En resumen, las diferentes configuraciones de lamas resultan en los modelos de cálculo con las características que se muestran en la Tabla 92:

Nº	Ángulo obstruido (°)		Ángulo visible (°)		Rango visible		Separación (m)		Nº Lamas	
	$\gamma$	$\alpha$	$\Gamma$	$\alpha$	$\gamma$	$\alpha$	Horiz	Vertic	Horiz	Vertic
1	0°	0°	90°	180°	0° a 90°	-90° a 90°	SM	SM	0	0
2	15°	0°	75°	180°	0° a 75°	-90° a 90°	0.37	SM	3	0
3	30°	0°	60°	180°	0° a 60°	-90° a 90°	0.17	SM	6	0
4	45°	0°	45°	180°	0° a 45°	-90° a 90°	0.10	SM	10	0
5	60°	0°	30°	180°	0° a 30°	-90° a 90°	0.06	SM	17	0
6	0°	15°	90°	150°	0° a 90°	-75° a 75°	SM	0.37	0	4
7	0°	30°	90°	120°	0° a 90°	-60° a 60°	SM	0.17	0	7
8	0°	45°	90°	90°	0° a 90°	-45° a 45°	SM	0.10	0	11
9	0°	60°	90°	60°	0° a 90°	-30° a 30°	SM	0.06	0	18
10	15°	15°	75°	150°	0° a 75°	-75° a 75°	0.37	0.37	4	4
11	30°	30°	60°	120°	0° a 60°	-60° a 60°	0.17	0.17	7	7
12	45°	45°	45°	90°	0° a 45°	-45° a 45°	0.10	0.10	11	11
13	60°	60°	30°	60°	0° a 30°	-30° a 30°	0.06	0.06	18	18

Tabla 92: Dispositivos de lamas fijas: valores de estudio

### Lamas fijas horizontales

El impacto sobre las condiciones anuales de iluminación natural e insolación de la incorporación de lamas fijas horizontales se muestra en la Figura 357 y la Tabla 93.

	<i>sUDI</i> med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	<i>SHGe</i>
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
00_ref	0,00%	2,14%	9,51%	58,50%	6,06%	54,93%	97,38%	73,48%	53,43%
12_h_15	0,00%	4,04%	14,86%	51,96%	1,90%	42,69%	94,05%	70,83%	51,85%
12_h_30	0,00%	5,83%	18,19%	42,81%	0,36%	30,80%	89,66%	66,09%	46,72%
12_h_45	0,00%	10,58%	23,07%	25,21%	0,12%	13,08%	77,65%	59,79%	37,67%
12_h_60	2,38%	30,68%	24,61%	3,69%	0,00%	0,00%	29,73%	38,46%	26,27%

Tabla 93: Serie 12: Lamas fijas horizontales. Indicadores anuales

La presencia de lamas horizontales fijas enfatiza el comportamiento observado para el caso de los voladizos: se produce una reducción de todos los indicadores y aumenta el porcentaje del plano de trabajo que se encuentra entre 100 y 500 lux.

En general se observa un cambio de comportamiento en los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural global y mantenida (DSg y DSm)*, de la *Insolación excesiva (SHGe)* y de la *Iluminancia Natural Útil simultánea (sUDI)* a partir de un ángulo de obstrucción de 45° en que aumenta drásticamente la pendiente de las diferentes curvas, especialmente la curva de *DSg*.

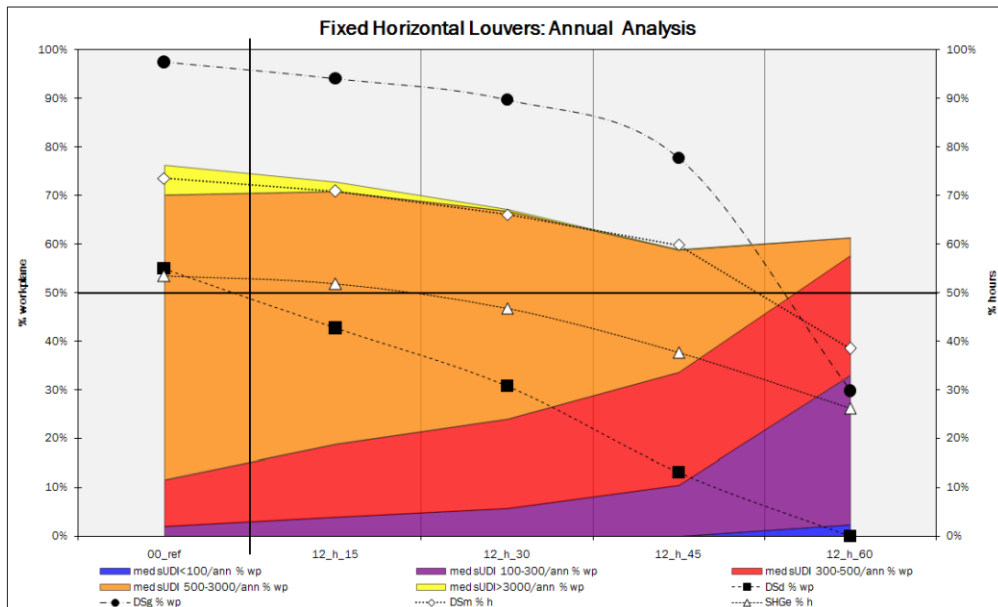


Figura 357: Serie 12: Lamas fijas horizontales. Indicadores anuales. P.M. Esquivias

En el caso de la *Suficiencia de Iluminación Natural difusa (DSd)* se produce una reducción lineal hasta adquirir un valor nulo en el modelo de mayor obstrucción. De hecho, sólo el modelo de referencia cumpliría con el *criterio de Suficiente Luz Natural* con la componente difusa. En este sentido el modelo de mayor obstrucción tampoco cumple el criterio con la componente global, tanto por cobertura del plano de trabajo ( $DSg < 50\%$ ) como por mantenimiento en el tiempo ( $DSm < 50\%$ ), por lo que esta opción de diseño arquitectónico debe estudiarse cuidadosamente en caso de incorporarse a un proyecto.

Tanto los indicadores *DSm* y *SHGe* siguen un comportamiento parabólico, observándose que, al alcanzar este último un valor aproximado del 40% se anula el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia mayor de 3000 lux. ( $sUDI > 3000 \approx 0\%$ ), tal como se apreció en el análisis del modelo de referencia.

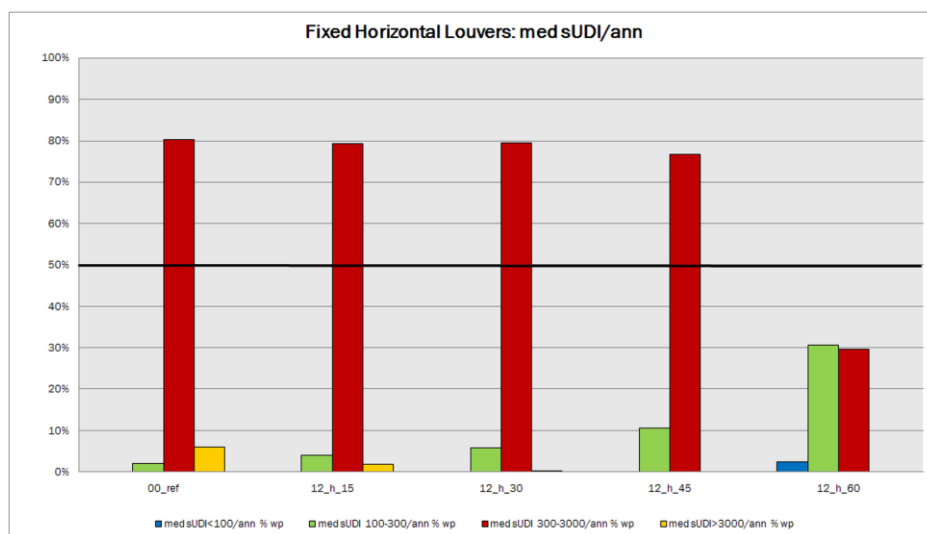


Figura 358: Lamas fijas horizontales. mediana anual sUDI. P.M. Esquivias

Considerando la iluminancia natural útil simultánea suficiente, es decir, el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 3000 lux, se observa que no se alcanza el requisito mínimo de 50% para un ángulo de obstrucción de las lamas fijas horizontales de 60°. En este caso, la cobertura entre 100 y 300 lux, es mayor que entre 300 y 3000 lux.

La relación proporcional de los diferentes modelos respecto al modelo de referencia muestra cómo la incorporación de lamas fijas horizontales apenas afecta al porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia menor de 100 lux y mayor de 3000 lux.

	sUDI med/ann				Daylight Sufficiency			SHGe
	100-300	300-500	500-3000	>3000	DSd	DSg	DSm	
00_ref	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12_h_15	1,89	1,56	0,89	0,31	0,78	0,97	0,96	0,97
12_h_30	2,72	1,91	0,73	0,06	0,56	0,92	0,90	0,87
12_h_45	4,94	2,43	0,43	0,02	0,24	0,80	0,81	0,71
12_h_60	14,34	2,59	0,06	0,00	0,00	0,31	0,52	0,49

Tabla 94: Serie 12: Lamas fijas horizontales. Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia

Sin embargo provoca una gran reducción del porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia simultánea entre 500 y 3000 lux, que favorece el aumento del plano de trabajo con una iluminancia comprendida entre 100 y 500 lux, es decir, favoreciendo las condiciones de iluminación natural para el desarrollo de tareas visuales de baja y media precisión.

Mientras este incremento es más suave para el rango de 300-500 lux, para el rango de 100-300 lux se produce un incremento suave en los primeros modelos con un cambio de pendiente para el modelo de mayor obstrucción.

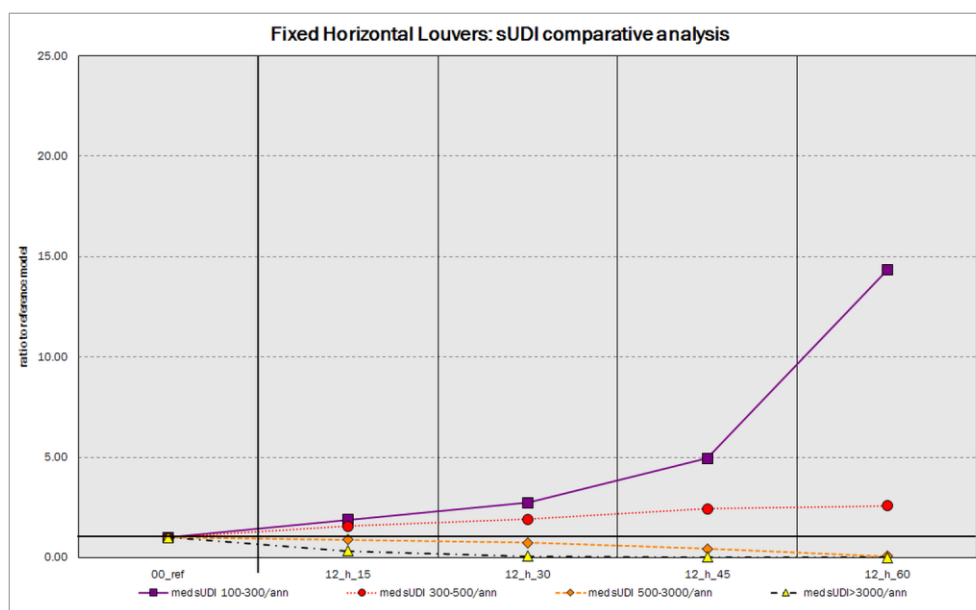


Figura 359: Variación del conjunto de indicadores sUDI respecto al modelo de referencia debido a la presencia de lamas fijas horizontales. P.M. Esquivias

La presencia de lamas fijas horizontales provoca la reducción de los valores de todos los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural* e *Insolación excesiva*, especialmente del indicador DSd, seguido del indicador DSg, DSm y SHGe. La máxima reducción de la *insolación excesiva* que es capaz de provocar las lamas horizontales es casi del 50% de las horas diurnas anuales, mientras que se puede reducir casi el 70% la *Suficiencia de Iluminación Natural global*.

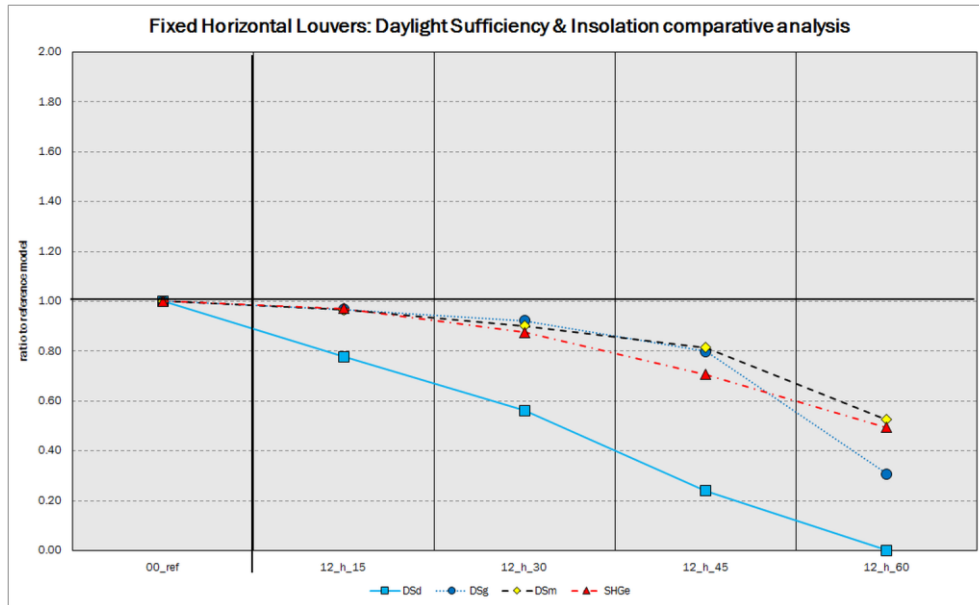


Figura 360: Variación del conjunto de indicadores *sUDI* respecto al modelo de referencia debido a la presencia de lamas fijas horizontales. *P.M. Esquivias*

Para mostrar la evolución mensual de los indicadores, se presentan las gráficas de los indicadores *DSg* y *sUDI<sub>500-3000</sub>*. También de especial interés es presentar la evolución de *SHGe*.

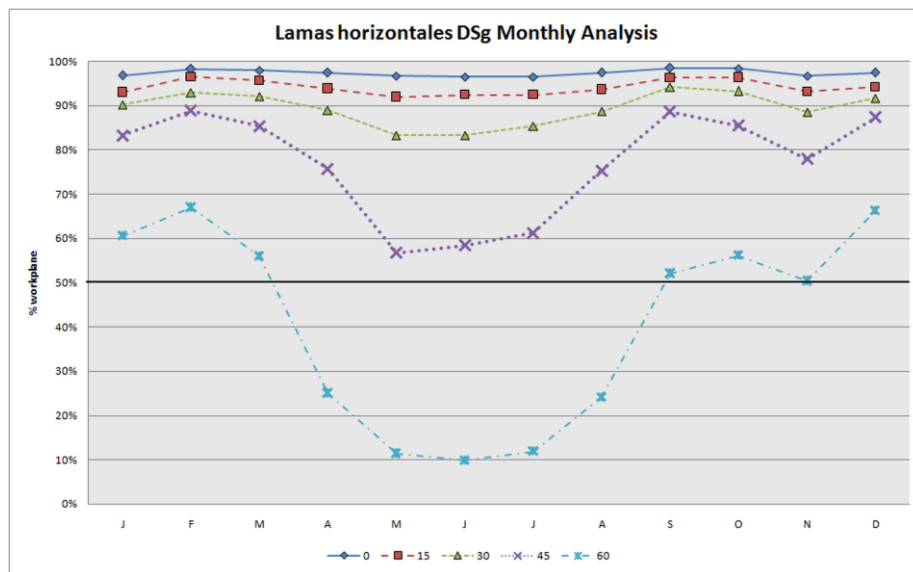


Figura 361: Valores mensuales de *DSg* debido a la presencia de lamas horizontales fijas. *P.M. Esquivias*

El aumento de la obstrucción que representan las lamas horizontales se traduce en la reducción de los valores mensuales de *DSg*, especialmente en los meses veraniegos. A partir de un ángulo de obstrucción de 45°, esta reducción también se hace más evidente en el periodo de invierno, provocando mínimos en Noviembre y Diciembre.

De hecho, para el caso de máxima obstrucción, al no alcanzarse un *DSg* mayor de 50% en más de la mitad de los meses, no sería una opción válida de diseño arquitectónico por no cumplir con los objetivos luminotécnicos.

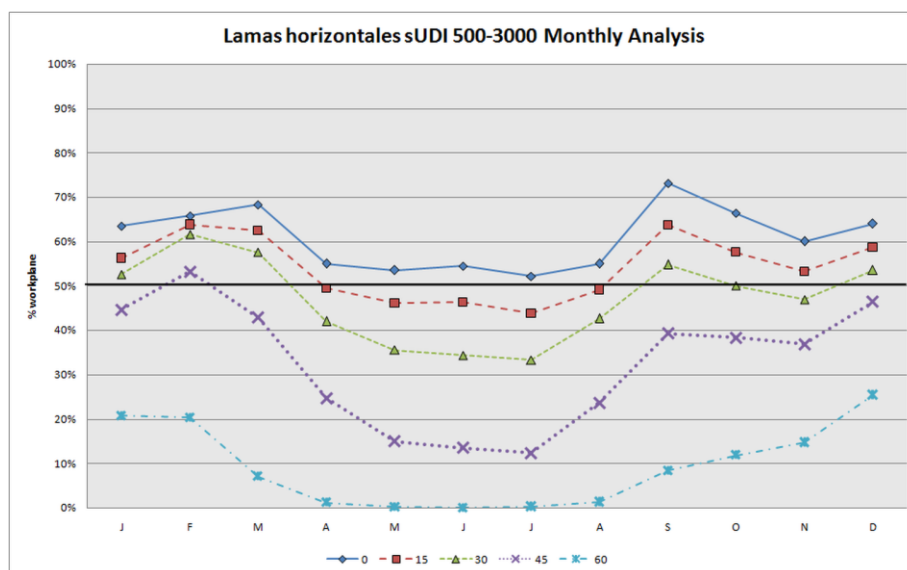


Figura 362: Valores mensuales de  $SHGe$  debido a la presencia de lamas horizontales fijas. P.M. Esquivias

La presencia de las lamas fijas horizontales produce una reducción progresiva de los valores mensuales de  $SHGe$ , siendo las curvas bastante similares hasta un ángulo de obstrucción de  $30^\circ$ . A partir de ahí, se producen mayores divergencias con las condiciones de insolación originales, aunque cabe señalar que para el modelo de mayor obstrucción siempre estaríamos con valores menores del 50% de las horas diurnas mensuales anuales. Sin embargo, los resultados también muestran un gran detrimento de las condiciones de iluminación natural.

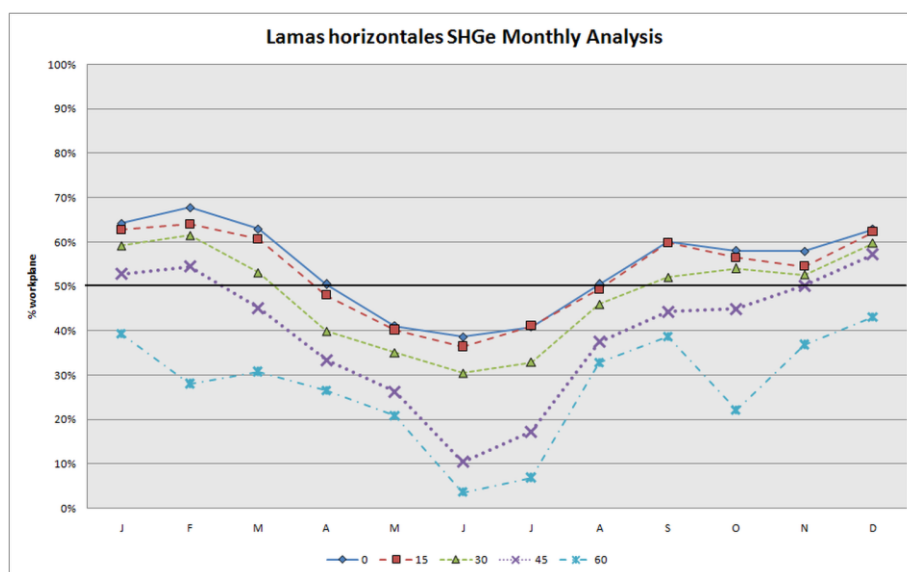


Figura 363: Valores mensuales de  $sUDI_{500-3000}$  debido a la presencia de lamas horizontales fijas. P.M. Esquivias

Se observa que la presencia de lamas fijas horizontales repercute en una reducción progresiva de los valores mensuales de  $sUDI_{500-3000}$  enfatizándose en los meses de verano.

Tal como afirmaba León [21] en su estudio, aunque los voladizos tienen un gran impacto en las fachadas orientadas al Sur, con las lamas horizontales se enfatiza su afección a las condiciones interiores, pudiendo extenderse a todas las orientaciones, salvo la Norte.

### Lamas fijas verticales

En el caso de la incorporación de lamas fijas verticales [Figura 364, Tabla 95] se observa un comportamiento parecido al de las lamas fijas horizontales: una fuerte reducción de  $DSg$ , reducción

linear de  $DSd$ , comportamiento parabólico de  $DSm$  y  $SHGe$  y aumento del área con una iluminancia entre 100 y 300 lux y menor de 100 lux en detrimento de los demás rangos de iluminación natural útil.

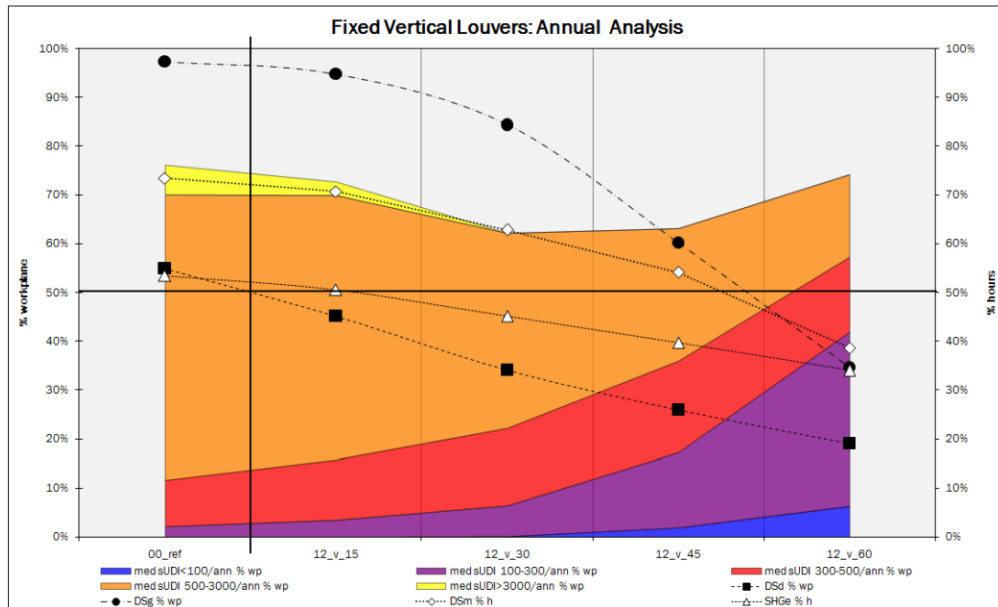


Figura 364: Serie 12: Lamas fijas verticales. Indicadores anuales. P.M. Esquivias

Tal como se observaba en el caso de las lamas fijas horizontales, sólo el modelo de referencia cumpliría con el *criterio de Suficiente Luz Natural* con la componente difusa. Además el modelo de mayor obstrucción tampoco cumpliría el criterio con la componente global, tanto por cobertura ( $DSg < 50\%$ ) como por mantenimiento ( $DSm < 50\%$ ), quedando, por tanto, también pendiente de un estudio concreto en caso de incorporarse a proyecto.

	sUDI med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	DSd	DSg	DSm	SHGe
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
00_ref	0,00%	2,14%	9,51%	58,50%	6,06%	54,93%	97,38%	73,48%	53,43%
12_v_15	0,00%	3,45%	12,37%	54,22%	2,73%	45,18%	94,89%	70,70%	50,61%
12_v_30	0,12%	6,30%	15,81%	40,07%	0,00%	34,01%	84,42%	62,80%	45,12%
12_v_45	1,90%	15,34%	18,79%	27,23%	0,00%	25,92%	60,17%	54,15%	39,74%
12_v_60	6,30%	35,67%	15,46%	16,88%	0,00%	19,02%	34,60%	38,65%	33,97%

Tabla 95: Serie 12: Lamas fijas verticales. Indicadores anuales

También se observa que para un  $SHGe$  de aproximadamente el 45% se anula el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia mayor de 3000 lux, reduciéndose la probabilidad de aparición de situaciones de deslumbramiento en el espacio de estudio.

Considerando la iluminancia natural útil simultánea suficiente, es decir, el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 3000 lux, se observa que no se alcanza la cobertura mínima para el modelo que representa un ángulo de obstrucción de 60°. En este caso, la cobertura entre 100 y 300 lux, es mayor que entre 300 y 3000 lux.

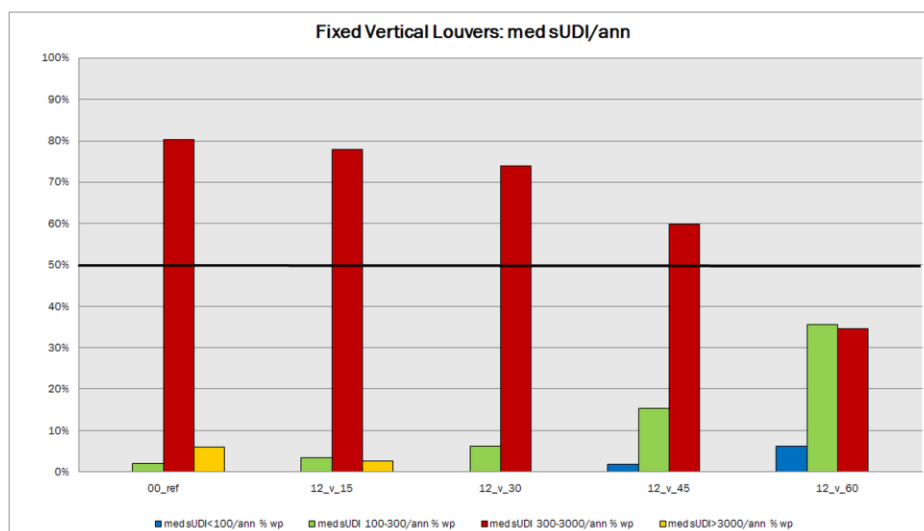


Figura 365: Lamas Fijas verticales. mediana anual *sUDI*. P.M. Esquivias

	<i>sUDI</i> med/ann				Daylight Sufficiency			<i>SHGe</i>
	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	
00_ref	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12_v_15	1,61	1,30	0,93	0,45	0,82	0,97	0,96	0,95
12_v_30	2,94	1,66	0,68	0,00	0,62	0,87	0,85	0,84
12_v_45	7,17	1,98	0,47	0,00	0,47	0,62	0,74	0,74
12_v_60	16,67	1,63	0,29	0,00	0,35	0,36	0,53	0,64

Tabla 96: Serie 12: Lamas fijas verticales. Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia

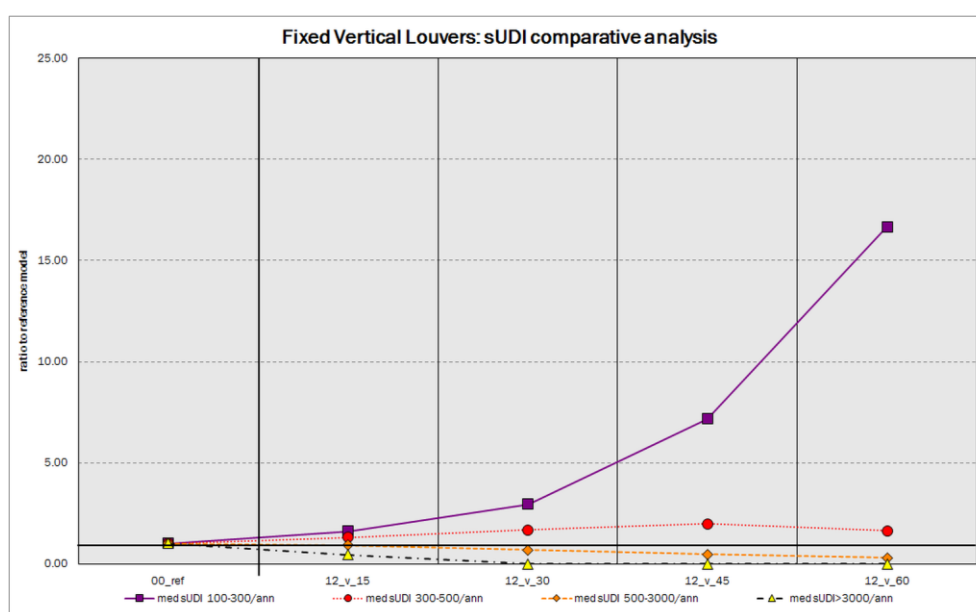


Figura 366: Variación del conjunto de indicadores *sUDI* respecto al modelo de referencia debido a la presencia de lamas fijas verticales. P.M. Esquivias

Las curvas de variación de *sUDI* respecto al modelo de referencia muestran cómo la presencia de lamas fijas verticales representa un incremento del porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 100 y 300 lux, con un ligero ascenso en el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 500 lux, especialmente con el mayor ángulo de obstrucción. Estos incrementos se ven acompañados por una reducción lineal del porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia simultánea entre 500 y 3000 lux y una reducción constante del porcentaje con iluminancia mayor de 3000 lux.



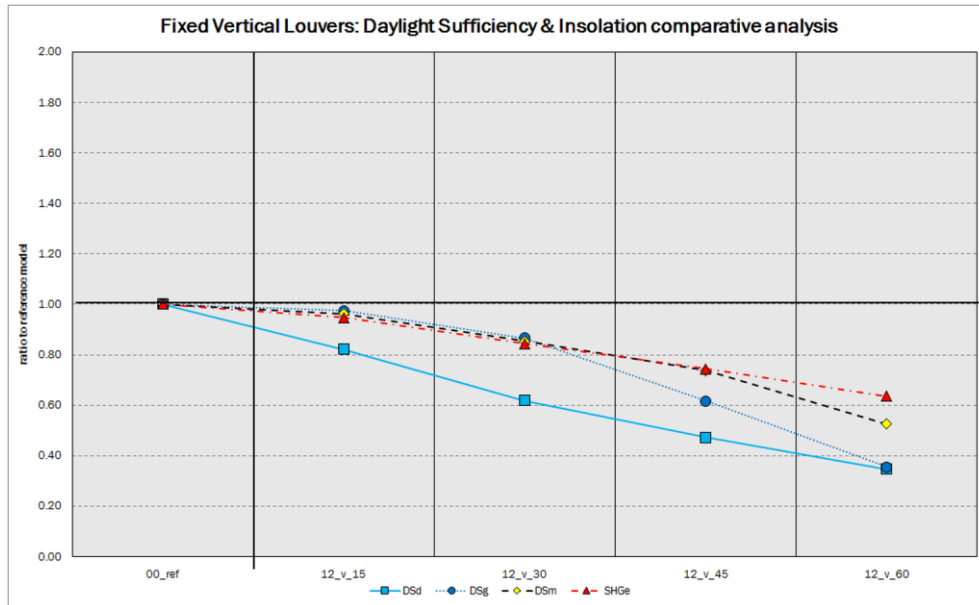


Figura 367: Variación de los indicadores  $DSg$ ,  $DSd$ ,  $DSm$  y  $SHGe$  respecto al modelo de referencia debido a la presencia de lamas fijas verticales. P.M. Esquivias

La presencia de lamas fijas verticales produce una reducción lineal del indicador  $DSd$ . También se observa una fuerte reducción del indicador  $DSg$ , que describe una curva parabólica. El indicador con menor reducción es el de *insolación excesiva*, de hasta un 40%.

La evolución mensual de los indicadores de radiación solar global de mayor variación se muestra en las siguientes gráficas.

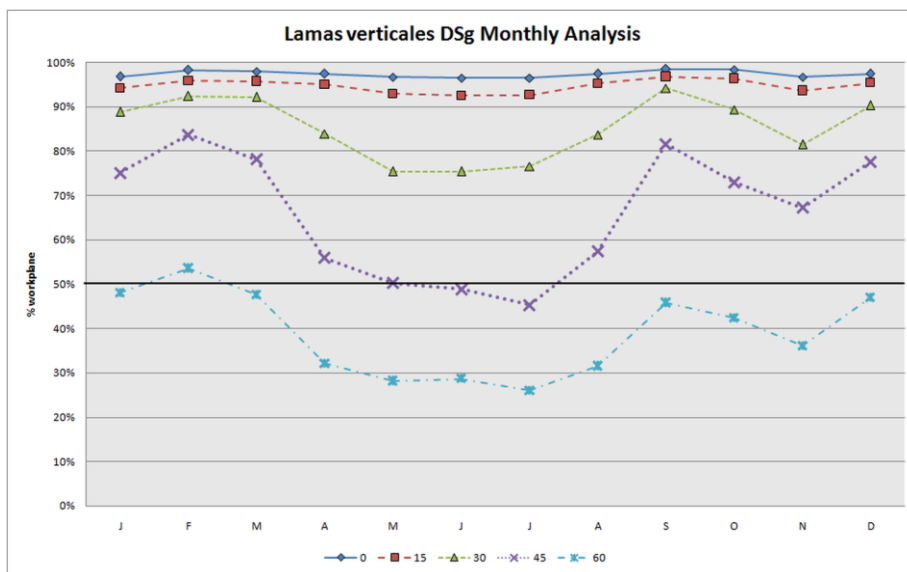


Figura 368: Valores mensuales de  $DSg$  debido a la presencia de lamas fijas verticales. P.M. Esquivias

Se puede observar que la incorporación de lamas fijas verticales produce una reducción de los valores mensuales de  $DSg$  especialmente en los meses de verano y en Noviembre. En los primeros modelos las curvas mensuales son bastante similares y se producen mayores divergencias a medida que aumenta el ángulo de obstrucción de las lamas. A partir de un ángulo de  $45^\circ$  se aprecia que aparecen meses en los que no se alcanza un  $DSg$  mayor del 50%, estando la última opción descartada por no alcanzar el objetivo lumínico.

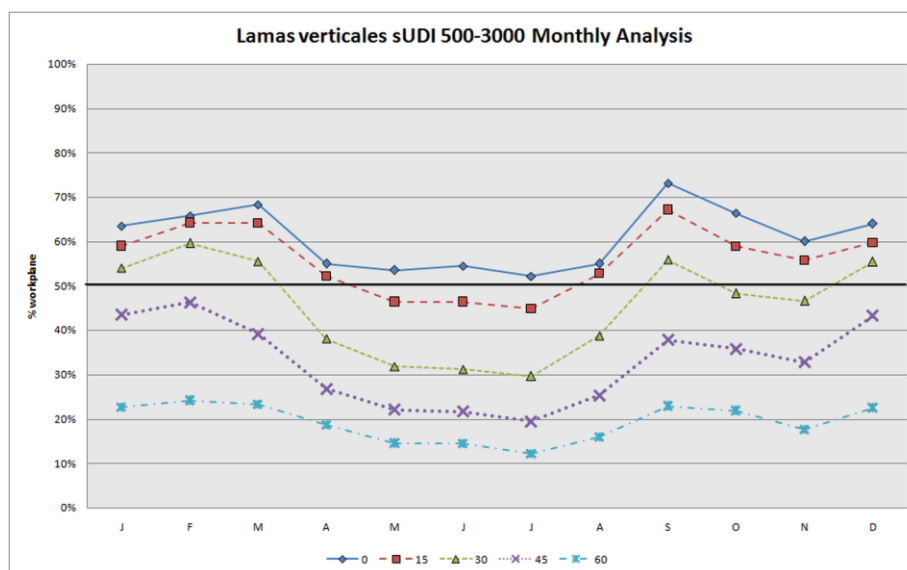


Figura 369: Valores mensuales de *sUDI 500-3000* debido a la presencia de lamas fijas verticales. P.M. Esquivias

Así también la presencia de lamas fijas verticales produce una progresiva reducción del porcentaje del plano de trabajo que mensualmente alcanza de forma simultánea una iluminancia entre 500 y 3000 lux. En este caso, las dos primeras curvas son bastante similares en cuantía y forma, aumentando la distancia con el siguiente modelo, así como suavizando los extremos encontrados en las siguientes curvas hasta adoptar una forma bastante plana a lo largo del año.

A la vista de los resultados cabe señalar, que mientras se apunta que los salientes verticales son los de menor efectividad a la hora de modificar las condiciones de iluminación natural e insolación, Esquivias [64] [119] señala que las lamas verticales, debido al doble ángulo de obstrucción, y por tanto de eliminación de la penetración solar en el espacio, es capaz de reducir drásticamente los valores de *suficiencia de luz natural*, lo cual concuerda con los resultados obtenidos.

### Retícula de lamas fijas

En el caso de la incorporación de una retícula, se observa el mismo comportamiento que el presentado por las lamas pero mucho más pronunciado [Figura 370, Tabla 97], más parecido al comportamiento de las lamas fijas verticales que al de las lamas fijas horizontales.

	<i>sUDI</i> med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	<i>SHGe</i>
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
00_ref	0,00%	2,14%	9,51%	58,50%	6,06%	54,93%	97,38%	73,48%	53,43%
12_r_15	0,00%	6,30%	15,81%	45,66%	0,59%	37,34%	89,89%	67,18%	47,32%
12_r_30	2,62%	19,74%	20,33%	19,98%	0,00%	18,79%	56,24%	52,32%	38,20%
12_r_45	12,84%	45,07%	14,27%	1,07%	0,00%	0,71%	15,46%	23,75%	24,19%
12_r_60	61,47%	38,53%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,94%	11,68%

Tabla 97: Serie 12: Retícula de lamas fijas. Indicadores anuales

Se observa que los indicadores *DSm* y *SHGe* mantienen su comportamiento parabólico, pero con una mayor pendiente; así también se aprecia el descenso linear del indicador *DSd*, llegando a ser nulo con un ángulo de obstrucción de 45°. El indicador que presenta una mayor reducción es el *DSg*, que presenta dos cambios de pendiente: al alcanzar una obstrucción de 15° y una obstrucción de 45°.

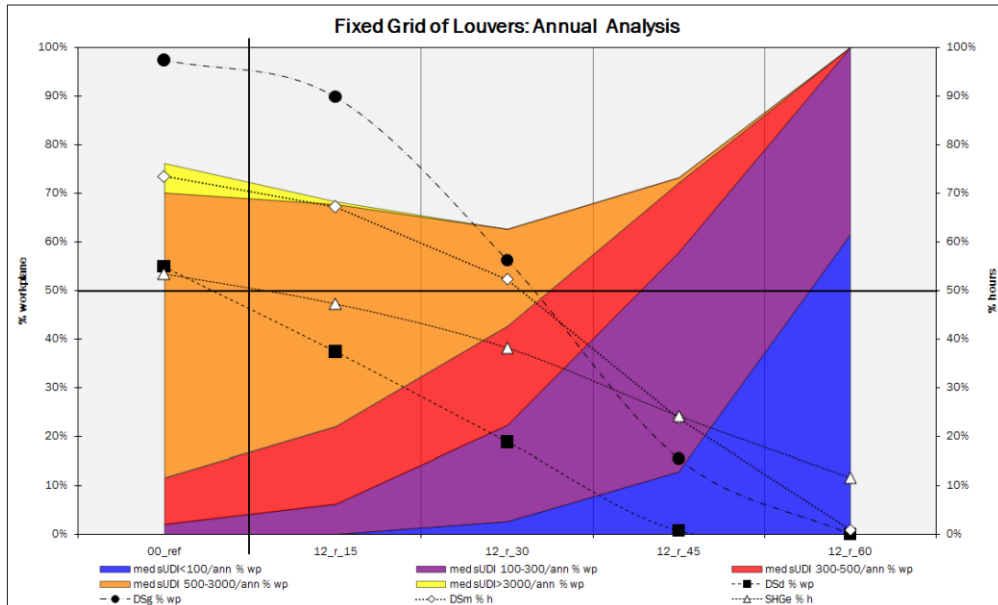


Figura 370: Serie 12: Retícula de lamas fijas. Indicadores anuales. P.M. Esquivias

En el caso de la retícula no se alcanza el *criterio de Suficiente Luz Natural* global a partir de una obstrucción de 30° ni de forma difusa con la incorporación de la retícula, quedando, por tanto, los modelos de 45° y 60° pendientes de un estudio más detallado en caso de considerarse como opción de proyecto arquitectónico.

Respecto a los rangos de iluminancia útil simultánea, se observa un fuerte incremento del área con una iluminancia entre 100 y 300 lux y menor de 100 lux, que provoca una reducción del porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente una iluminancia mayor de 300 lux.

También se observa que para un SHGe de aproximadamente el 45% se anula el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia mayor de 3000 lux, reduciéndose la probabilidad de aparición de situaciones de deslumbramiento en el espacio de estudio.

Considerando la iluminancia natural útil simultánea suficiente, es decir, el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 3000 lux, se observa que no se alcanza la cobertura mínima a partir de un ángulo de obstrucción de 45°.

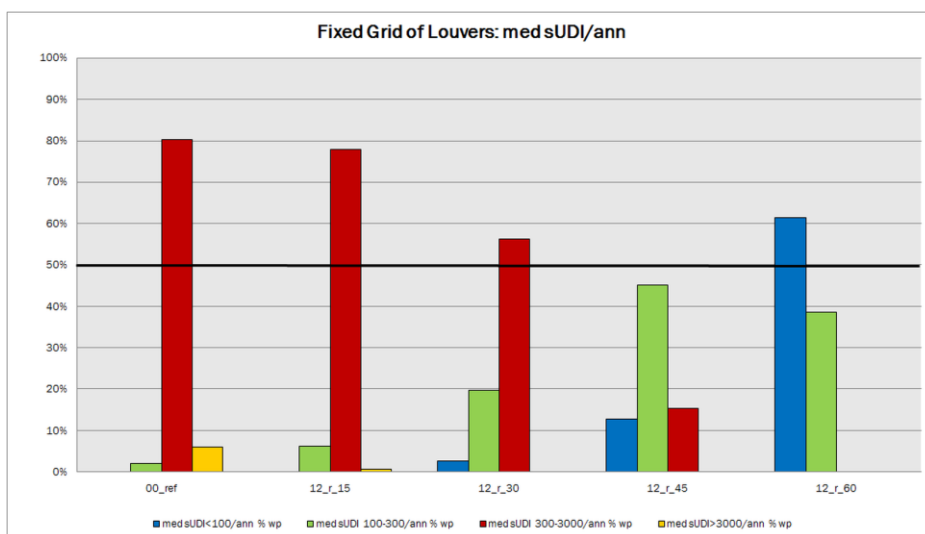


Figura 371: Retícula de lamas fijas. mediana anual sUDI. P.M. Esquivias

En el caso de 45° la cobertura del plano de trabajo con una iluminancia comprendida entre 100 y 300 casi alcanza un valor del 50%. En el caso de 60° predomina la iluminancia menor de 100 lux, superando la mitad del plano de trabajo.

La relación proporcional de los diferentes modelos respecto al modelo de referencia muestra que la mayor variación de los valores de los indicadores de Suficiencia iluminación natural e insolación se produce para el indicador *DSg*, seguido de *DSm*, *DSd* y *SHGe*.

	<i>sUDI</i> med/ann				Daylight Sufficiency			<i>SHGe</i>
	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	
00_ref	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12_r_15	2,94	1,66	0,78	0,10	0,68	0,92	0,91	0,89
12_r_30	9,22	2,14	0,34	0,00	0,34	0,58	0,71	0,72
12_r_45	21,06	1,50	0,02	0,00	0,01	0,16	0,32	0,45
12_r_60	18,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,22

Tabla 98: Serie 12: Retícula de lamas fijas. Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia

Respecto a los rangos de iluminancia útil simultánea, se observa también un fuerte incremento del área con una iluminancia entre 100 y 300 lux, que se ve reducido en el modelo de mayor obstrucción a favor de la aparición de superficie con una iluminación menor de 100 lux, requiriendo de una presencia constante de iluminación artificial.

Se observa que la incorporación de una retícula de lamas fijas provoca un incremento en el porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 100 y 300 lux, llegando al máximo para el modelo de 45°. También se produce un ligero aumento del porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia entre 300 y 500 lux pero en el modelo de mayor ángulo este porcentaje finalmente es menor que el obtenido en el modelo de referencia.

Por otro lado, se reduce el porcentaje del plano de trabajo que se encuentra con una iluminancia entre 500 y 3000 lux y una reducción mantenida de la porción del plano de trabajo con una iluminancia mayor de 3000 lux.

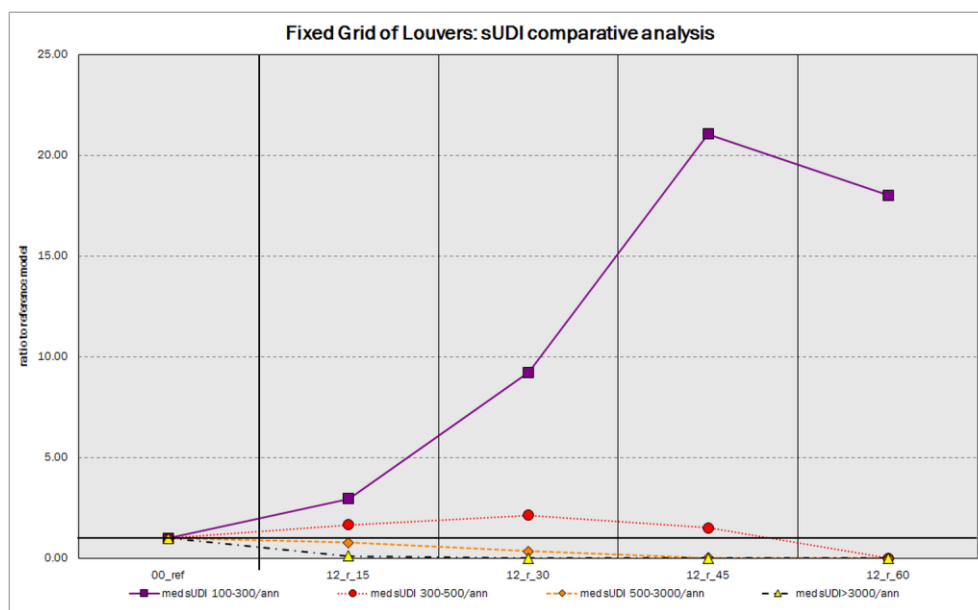


Figura 372: Variación del conjunto de indicadores *sUDI* respecto al modelo de referencia debido a la presencia de una retícula de lamas fijas. P.M. Esquivias

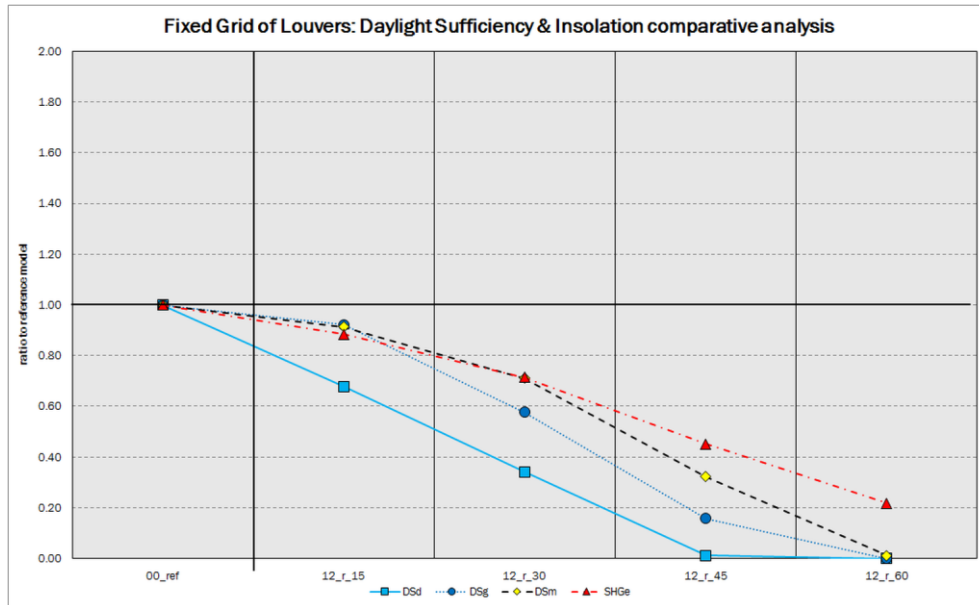


Figura 373: Variación de los indicadores *DSg*, *DSd*, *DSm* y *SHGe* respecto al modelo de referencia debido a la presencia de una retícula de lamas fijas. P.M. Esquivias

La incorporación de una retícula de lamas fijas provoca una fuerte reducción de todos los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural* y de *Insolación excesiva*, de modo que con el modelo de mayor ángulo de obstrucción se anulan casi todos los indicadores. También presenta una reducción casi lineal el indicador de *Insolación excesiva*, alcanzando una reducción de hasta el 80% del valor inicial.

La evolución mensual de los indicadores de radiación global de mayor variación se muestra a continuación.

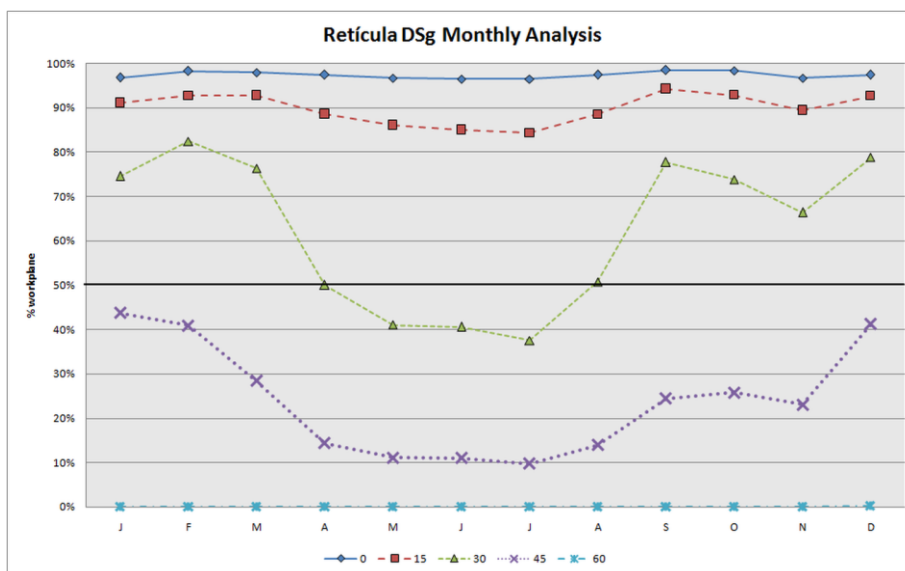


Figura 374: Valores mensuales de *DSg* debido a una retícula de lamas fijas. P.M. Esquivias

Se observa cómo la incorporación de una retícula de lamas fijas produce fuertes reducciones de los valores mensuales para ángulos de obstrucción a partir de 30°. Principalmente la reducción se produce en los meses veraniegos, con ciertos matices durante el invierno.

El modelo con ángulo de obstrucción de 30° presenta varios meses con un valor de *DSg* menor de 50%, por lo que habría que estudiarlo con más detenimiento para asegurar el cumplimiento de

los objetivos luminotécnicos. Sin embargo los modelos de 45 y 60° deberían descartarse como opciones de diseño ya que en ningún momento presentan un  $DSg$  mayor de 50%.

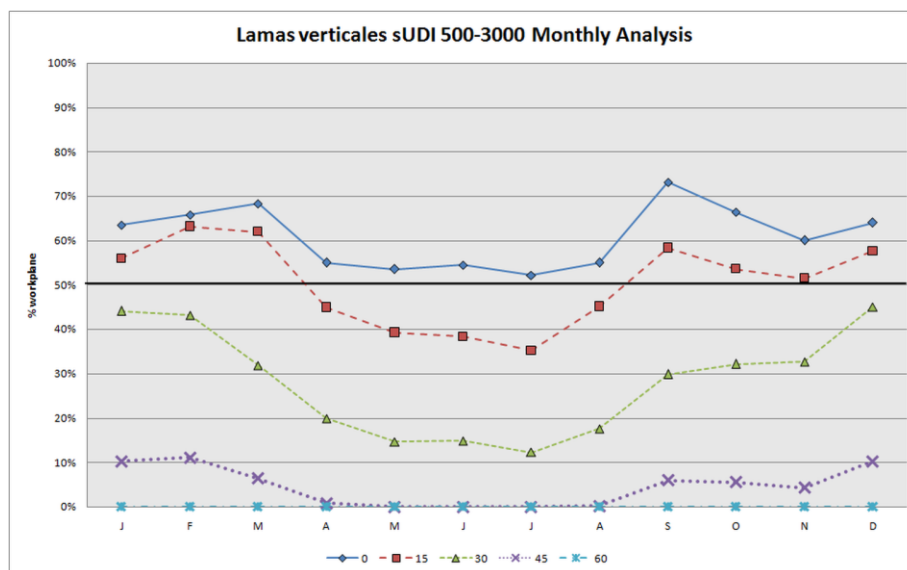


Figura 375: Valores mensuales de  $sUDI\ 500-3000$  debido a una retícula de lamas fijas. P.M. Esquivias

También se puede observar que las mayores diferencias respecto al modelo de referencia se producen a partir del modelo de 30° de obstrucción. En este caso, las curvas suavizan los extremos de las condiciones iniciales y se reducen principalmente en verano, formando una curva en forma de campana invertida, que se va aplanando a medida que aumenta el ángulo de obstrucción.

### Resumen del análisis de los dispositivos de lamas fijas

Tal como se ha podido observar la incorporación de dispositivos de protección solar fija basados en múltiples elementos produce una reducción lineal de  $DSd$ , comportamiento parabólico descendente de  $DSm$  y  $SHGe$ , una fuerte reducción de  $DSg$  y un pronunciado incremento del porcentaje del plano de trabajo con una iluminancia comprendida entre 100 y 300 lux.

En general, y coincidiendo con los resultados analizados en el estado del arte, se confirma que la combinación de elementos horizontales y verticales resultan más eficaz que la utilización de geometrías más sencillas [142] [348]. Por orden de impacto, las lamas fijas horizontales presentan el comportamiento más suave y la retícula de lamas fijas presenta el comportamiento más pronunciado.

En los tres conjuntos se observa que sólo el modelo de referencia consigue un  $DSd > 50\%$ , quedando el cumplimiento del *criterio de Suficiente Luz Natural* a cargo de la iluminancia global. Sin embargo, los modelos de mayor ángulo de obstrucción tampoco cumplen el criterio por falta de cobertura y de mantenimiento de las condiciones de iluminación natural en el plano de trabajo, siendo por tanto excluidos como opciones de diseño arquitectónico. Estos modelos corresponden con un ángulo de obstrucción de 60° en el caso de las lamas fijas horizontales y verticales y de 45° y 60° en el caso de la retícula de lamas fijas.

Cualitativamente [Anexo B], la presencia de lamas fijas y de retícula de lamas redundan en una mayor uniformidad en la distribución de la luz natural y de la insolación del espacio. En el caso de las lamas fijas verticales, las aislíneas se concentran en el ancho de la ventana pero alcanzan una mayor profundidad.

## 4.5 Análisis de los indicadores

Una vez realizado el análisis de los resultados para cada serie de estudio, se procede al análisis transversal de los resultados para proporcionar una visión del impacto de cada uno de los parámetros de estudio sobre cada uno de los indicadores de iluminación natural e insolación.

Los parámetros de estudio seleccionados, pueden clasificarse, en una primera instancia, según su naturaleza, dando lugar a tres grupos de parámetros:

1. Elementos exteriores: Condiciones climáticas, elementos del entorno, orientación
2. Elementos captadores: Tamaño, transparencia, posición, forma, división y distribución del hueco
3. Elementos protectores: Voladizos, salientes laterales y sistemas de lamas fijas. Debido al comportamiento diferenciado observado en el análisis de la serie de dispositivos de lamas fijas, en este capítulo se analizan separadamente los parámetros lamas fijas horizontales, lamas fijas verticales y retícula de lamas fijas.

Para cada uno de los parámetros se ha estudiado la evolución de cada indicador en función de la serie de modelos definida. De dicho estudio se puede obtener, por tanto, el rango de variación de cada parámetro en función de cada indicador, así como la desviación estándar.

Siendo el objetivo de esta investigación estudiar las condiciones de iluminación natural e insolación se marcan, en base a los nuevos indicadores obtenidos, varios objetivos:

1. Conseguir la máxima *Suficiencia de Iluminación Natural global (DSg)* y *mantenida (DSm)*
2. Para realizar tareas visuales de precisión alta: maximizar la *Iluminancia Natural Útil Simultánea* entre 500 y 3000 lux ( $sUDI_{500-3000}$ )
3. Para realizar tareas visuales de precisión media: maximizar la *Iluminancia Natural Útil Simultánea* entre 300 y 500 lux ( $sUDI_{300-500}$ )
4. Para realizar tareas visuales de precisión baja: maximizar la *Iluminancia Natural Útil Simultánea* entre 100 y 300 lux ( $sUDI_{100-300}$ )
5. Minimizar la *Insolación excesiva (SHGe)* y el porcentaje del plano de trabajo con una *Iluminancia Natural Útil Simultánea* mayor de 3000 lux ( $sUDI_{>3000}$ )
6. Para reducir el consumo energético de iluminación permanente: minimizar la *Iluminancia Natural Útil Simultánea* menor de 100 lux ( $sUDI_{<100}$ )

Así también forma parte de los objetivos de esta investigación estudiar el impacto de cada uno de los parámetros sobre las condiciones de iluminación natural e insolación. Para ello, se procede a analizar el rango de variación que cada uno de los parámetros arroja sobre cada uno de los nuevos indicadores.





### 4.5.1 Suficiente iluminación natural

El análisis de la *Suficiente Iluminación Natural* se centra en los tres indicadores desarrollados para mostrar la consecución del *criterio de Iluminación Suficiente* bajo un análisis temporal del perfil horario de iluminancias diurnas.

De esta forma se analiza cómo cada parámetro de estudio tiene la capacidad de reducir o incrementar el porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente 300 lux durante el 50% de las horas diurnas, ya sea debido a la componente difusa como a la integración de la componente directa y difusa de la luz natural (*Suficiente Iluminación Natural difusa y global*), así como su capacidad para reducir o incrementar el porcentaje de horas diurnas en que se alcanza simultáneamente 300 lux en el 50% del plano de trabajo (*Suficiente Iluminación Natural mantenida*).

En el análisis de estos indicadores se combina el análisis de los valores estadísticos de cada serie con los resultados obtenidos en el análisis de este indicador efectuado por cada uno de los parámetros, para un mejor entendimiento del comportamiento de cada parámetro.

A partir de los resultados de todas las series se han obtenido los valores estadísticos para el indicador *Suficiente Iluminación Natural difusa (DSd)* según cada parámetro de estudio. Si se diseña el edificio considerando sólo la contribución difusa de la luz natural, debe tenerse en cuenta el impacto sobre este indicador de los diferentes parámetros, expresado a través de la desviación estándar. De este modo se obtiene el siguiente orden de mayor a menor impacto, expresado tanto en la Tabla 99 como en la Figura 376:

Valor de referencia	DSd						
	máximo	mediana	media	mínimo	Rango	Desv. Std	
54,93%	Posición	74.08%	36.62%	35.49%	4.52%	69.56%	25.64
	Tamaño	100.00%	100.00%	88.71%	24.14%	75.86%	25.28
	Retícula	54.93%	18.79%	22.35%	0.00%	54.93%	23.80
	L. horizontales	54.93%	30.80%	28.30%	0.00%	54.93%	22.11
	Obstrucción	54.93%	43.40%	39.16%	15.81%	39.12%	16.25
	Transparencia	54.93%	30.92%	33.53%	14.63%	40.31%	14.86
	L. verticales	54.93%	34.01%	35.81%	19.02%	35.91%	14.46
	Voladizo	54.93%	33.29%	36.27%	25.09%	29.85%	12.26
	División	57.31%	41.50%	44.93%	28.78%	28.54%	8.99
	Localización	55.29%	49.35%	47.63%	30.20%	25.09%	7.28
	Distribución	73.48%	68.31%	65.31%	54.93%	18.55%	6.66
	Forma	57.55%	54.82%	50.99%	36.86%	20.69%	6.66
	Saliente	54.93%	48.51%	49.50%	47.44%	7.49%	2.57
Orientación	55.29%	54.64%	54.61%	53.86%	1.43%	0.41	

Tabla 99: Valores estadísticos del indicador *DSd*

En principio se observa que, salvo en siete parámetros, se reducen las condiciones iniciales del modelo de referencia. También se observa que sólo los parámetros orientación y distribución del hueco mantienen todos sus valores estadísticos por encima del requisito mínimo del 50% del plano de trabajo con una iluminancia de 300 lux.

Debe señalarse que el valor del modelo de referencia está muy próximo al valor del requisito mínimo, por lo que el margen de variación negativo respecto a las condiciones iniciales es muy corto, por lo que la modificación del modelo de referencia que produzca la reducción del valor inicial es susceptible de proporcionar un valor inferior al requisito. El análisis pormenorizado de los

modelos que proporcionan valores inferiores al 50%, sin embargo, ya se ha realizado en el correspondiente análisis de cada una de las series de estudio.

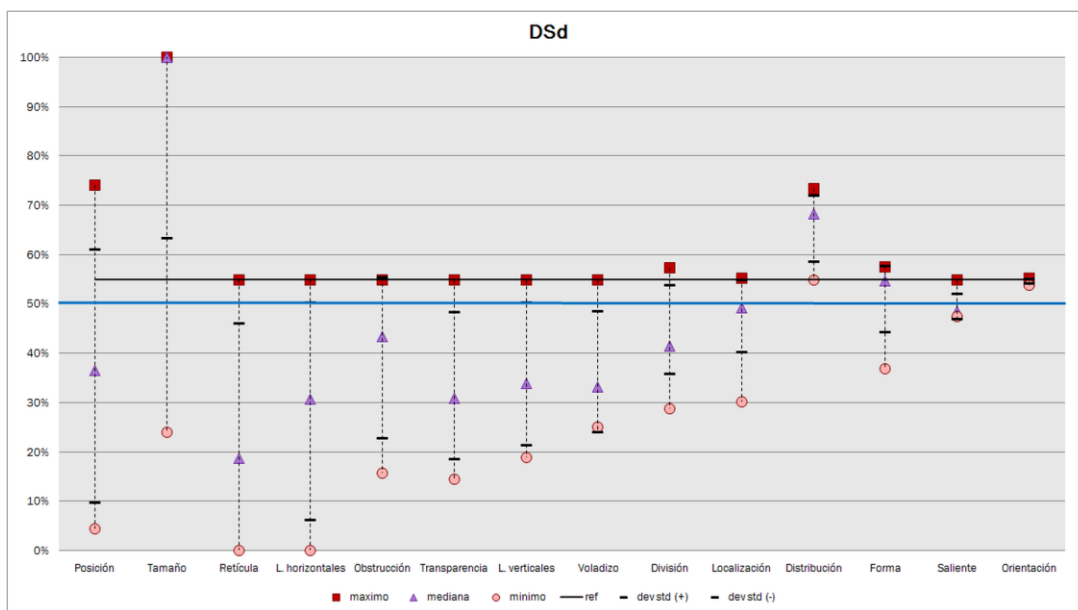


Figura 376: DSD. Valores estadísticos, referencia y requisito según parámetro. P.M. Esquivias

Para el caso de la retícula de lamas, las lamas horizontales, el ángulo de obstrucción, la transparencia del vidrio, las lamas verticales, el voladizo y el saliente lateral el comportamiento es similar: el valor máximo coincide con el valor del modelo de referencia, por lo que todos los modelos de la serie reducen las condiciones iniciales. Sin embargo se diferencian entre ellos en el valor mínimo, de la mediana y en el rango de la desviación estándar.

Por otro lado, para el caso de la distribución del hueco el comportamiento es el inverso: el mínimo coincide con el valor de referencia por lo que todas las modificaciones del modelo de referencia sufridas en esta serie contribuyen a incrementar las condiciones iniciales.

Tal como se pudo apreciar en el análisis de la posición del hueco, más de la mitad de los modelos reducían el valor de *DSD* por debajo de 50%, reflejándose en el valor de la mediana. También se observó que el valor máximo era un caso excepcional dentro de la serie.

Con respecto al tamaño del hueco, ya se indicó que el modelo de menor superficie provocaba una fuerte reducción de este indicador, siendo un caso excepcional de esta serie. La mayoría de los modelos alcanzaban un *DSD* del 100%, valor donde se sitúa también la mediana de los valores.

En lo relativo a los elementos de protección solar se pudo apreciar que todos ellos tienen un carácter reductor de las condiciones iniciales y que al introducir una protección con un ángulo de obstrucción de 15° ya se reducía el valor de este indicador por debajo de 50%, tal como se refleja en los valores estadísticos, en los que la mediana se encuentra siempre por debajo de este valor.

El ángulo de obstrucción y la transparencia del vidrio también pueden interpretarse como elementos reductores de las condiciones iniciales. En el caso de la obstrucción del entorno, se vio que con un ángulo de 30° ya se reducía el valor de *DSD* por debajo de 50%. En el caso de la transparencia del vidrio, no se alcanza el requisito reduciendo la transmitancia visible al 80%.

En lo que respecta a la división del hueco, se observó que todos los modelos que mantenían la altura del hueco original se encontraban por encima del 50%, pero cualquier otra modificación reducía el valor de *DSD*, así también se pudo apreciar que los modelos cuya superficie acristalada estaba por debajo del plano de trabajo reducían drásticamente las condiciones iniciales. Como

resultado, más de la mitad de los modelos no alcanzan el requisito mínimo, tal como indica el valor de la mediana.

La localización provoca un ligero incremento de las condiciones iniciales pero también la reducción de las mismas. El valor de la mediana casi alcanza el requisito mínimo, por lo que aproximadamente la mitad del rango estudiado en esta sería alcanzaría un  $DSd$  del 50%.

Tal como se ha comentado antes, la distribución del hueco en varios paramentos provoca siempre el incremento de las condiciones iniciales. De hecho, en el análisis de la serie se observó que cuanto más se distribuía la superficie del hueco más se aumentaba el indicador  $DSd$ , así como que la presencia de hueco en orientación Norte también reportaba grandes incrementos.

La forma del hueco, por su menor desviación estándar, matiza las condiciones iniciales. De hecho, más de la mitad de los modelos presentan un valor de  $DSd$  similar al modelo de referencia. Sin embargo, cuando hay superficie de hueco por debajo de la altura del plano de trabajo se reducen las condiciones iniciales.

Tal como era de esperar al estudiar la contribución difusa, la desviación estándar de la orientación es mínima, por lo que su variación apenas influye en el resultado del indicador  $DSd$ .

Los valores estadísticos para el indicador *Suficiente Iluminación Natural global (DSg)* según cada parámetro de estudio se presentan en la Tabla 100 y se representan en la Figura 377. Considerando que este indicador integra la contribución directa y difusa de la iluminación en el espacio, por lo que se acerca más a la realidad que considerar sólo la contribución difusa, será fundamental tenerlo en cuenta para el diseño arquitectónico de los nuevos edificios y la evaluación de los edificios existentes.

En este contexto, por tanto, es necesario conocer la sensibilidad de este indicador a ser modificado por los diferentes parámetros, lo que proporcionará una mayor o menor libertad de movimiento según cada parámetro. Considerando el valor de la desviación estándar se obtiene el siguiente orden de influencia de cada uno de los parámetros sobre este indicador:

Valor de referencia	DSg						
	máximo	mediana	media	mínimo	Rango	Desv. Std	
97.38%	Retícula	97.38%	56.24%	51.79%	0.00%	97.38%	43.45
	Posición	98.45%	94.05%	67.01%	9.27%	89.18%	43.13
	Obstrucción	97.38%	79.49%	70.29%	29.25%	68.13%	30.47
	Transparencia	97.38%	71.70%	68.61%	27.47%	69.91%	28.05
	L. horizontales	97.38%	89.66%	77.69%	29.73%	67.65%	27.83
	L. verticales	97.38%	84.42%	74.29%	34.60%	62.78%	26.62
	Tamaño	100.00%	100.00%	94.31%	40.07%	59.93%	18.01
	Localización	97.50%	95.07%	86.06%	53.03%	44.47%	15.62
	División	98.34%	93.94%	87.52%	64.09%	34.25%	13.30
	Orientación	97.38%	94.71%	91.80%	79.55%	17.83%	5.95
	Voladizo	97.38%	94.29%	93.67%	89.42%	7.96%	3.20
	Forma	98.34%	97.38%	96.70%	92.15%	6.19%	1.73
	Distribución	97.38%	95.66%	95.56%	93.46%	3.92%	1.45
	Saliente	97.38%	96.91%	96.76%	95.48%	1.90%	0.58

Tabla 100: Valores estadísticos del indicador  $DSg$

En lo que concierne a la contribución global de la iluminación natural debido a que el valor de  $DSg$  del modelo de referencia es bastante alto, el rango de la mayoría de los parámetros

estudiados reduce las condiciones iniciales, sólo hay cinco parámetros capaces de aumentar las condiciones iniciales, que son: la posición del hueco, el tamaño, la localización, la división del hueco y la forma del mismo, aunque su incremento como máximo es del 2'62 % respecto al valor del modelo de referencia.

Tal como se comentó anteriormente, los elementos de protección solar tienen un carácter reductor, ya que el valor máximo coincide con el valor de referencia, por lo que las modificaciones sufridas por el modelo de referencia, siempre reducen las condiciones iniciales. Sin embargo se diferencian entre ellos en el impacto que ejercen sobre el indicador *DSg*.

De este modo para la retícula de lamas no son aptos ángulos de obstrucción mayores de 30°, ya que reducen drásticamente las condiciones iniciales hasta anularlas. No obstante para las lamas horizontales y verticales no se admite un ángulo de obstrucción de 60°.

En otro orden de valores se muestran el voladizo y el saliente lateral, que aunque reductores de las condiciones iniciales, no presentan detrimentos tan drásticos, estando todos los modelos por encima del requisito mínimo. Tal como se señaló en el análisis del saliente lateral, éste apenas influye sobre este indicador cuando el modelo está orientado al Sur.

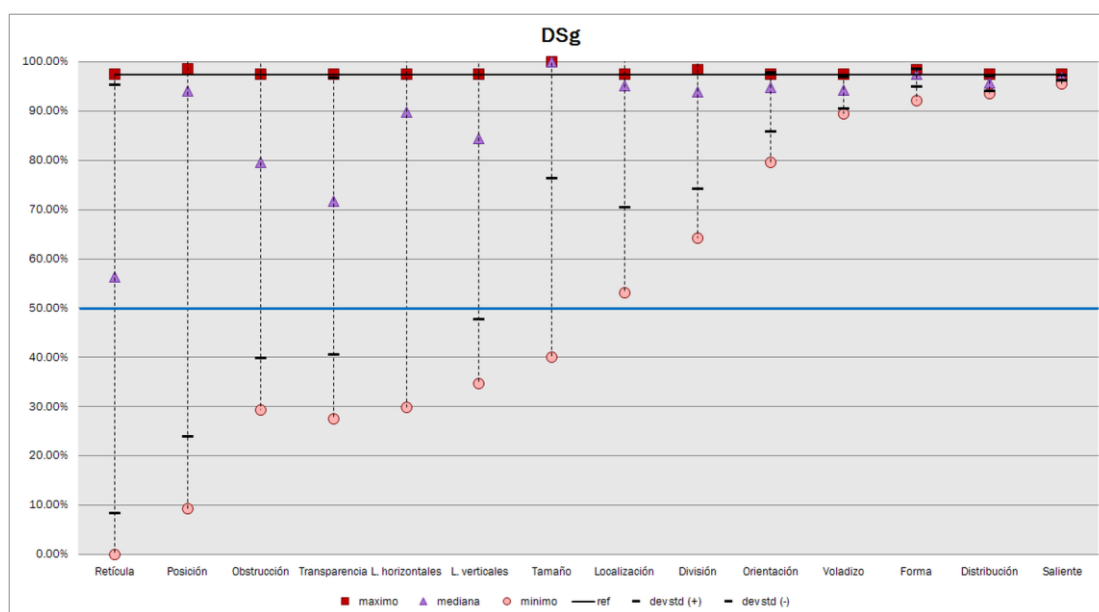


Figura 377: *DSg*. Valores estadísticos, referencia y requisito según parámetro. P.M. Esquivias

En el caso de la posición del hueco, sólo una de las modificaciones produce un incremento de las condiciones iniciales, mientras que todos los demás modelos las reducen. La gran mayoría de los modelos mantienen sus valores alrededor del valor de referencia tal como muestra el valor de la mediana. Tal como se evidenció en el análisis de la serie, los tres modelos con la posición inferior al plano de trabajo reducían drásticamente las condiciones iniciales.

El ángulo de obstrucción y la transparencia siguen presentando comportamientos parecidos en este indicador. En ambos casos son los dos últimos modelos de la serie los que no alcanzan el requisito mínimo. No obstante, los valores del ángulo de obstrucción son mayores que los de la transparencia tal como se puede observar en el valor de la mediana de ambos parámetros.

Tal como se ha comentado, en el caso del tamaño del hueco, casi todos los modelos proporcionan el valor máximo, siendo el valor mínimo un caso excepcional dentro de la serie. De hecho, se encuentra bastante alejado del rango de la desviación estándar.

En cuanto a la localización, se observa que todos los modelos superan el requisito mínimo, incluso en aquellas localizaciones donde se tendrían mayores dudas. No obstante, se observa que la mediana está muy próxima al valor máximo lo cual indica la mayor concentración de modelos alrededor de dicho valor.

La división del hueco puede reducir el valor de  $DSg$  hasta el 64%. Sin embargo, mientras la mayoría de los modelos se mantienen alrededor del valor de referencia, las reducciones se producen en aquellos modelos que presentan superficie de hueco por debajo del plano de trabajo.

La reducción máxima del valor de  $DSg$  que produce la orientación es de aproximadamente el 20%, manteniéndose la mayoría de los modelos alrededor del valor de referencia, tal como muestra el valor de la mediana. La desviación estándar es de apenas 6%, por lo que casi todos los modelos se encuentran dentro de rango.

La forma y la distribución del hueco se pueden considerar como parámetros matizadores de las condiciones de iluminación natural, ya que presentan una muy baja variación de este indicador.

Otro aspecto a tener en cuenta es el mantenimiento de las condiciones de iluminación natural a lo largo del tiempo, expresado mediante el indicador *Suficiente Iluminación Natural mantenida (DSm)*. Se muestran a continuación los valores estadísticos de los diferentes parámetros ordenados según el valor de la desviación estándar, de mayor a menor.

Valor de referencia	DSm						
	máximo	mediana	media	mínimo	Rango	Desv. Std	
73.48%	Retícula	73.48%	52.32%	43.53%	0.94%	72.54%	30.57
	Posición	73.48%	68.08%	51.00%	10.95%	62.52%	28.32
	Obstrucción	73.48%	67.70%	53.27%	8.63%	64.85%	27.59
	Transparencia	73.48%	61.61%	55.23%	20.73%	52.74%	19.52
	L. verticales	73.48%	62.80%	59.96%	38.65%	34.83%	14.09
	L. horizontales	73.48%	66.09%	61.73%	38.46%	35.02%	14.01
	Tamaño	88.51%	86.16%	81.00%	41.21%	47.30%	13.86
	Localización	75.81%	68.72%	66.04%	51.38%	24.43%	8.15
	División	74.03%	66.30%	67.45%	58.47%	15.57%	5.53
	Voladizo	73.48%	67.84%	68.11%	63.83%	9.65%	3.96
	Forma	74.57%	73.48%	72.00%	64.77%	9.80%	3.22
	Distribución	80.87%	78.18%	77.91%	73.48%	7.39%	2.43
	Orientación	74.01%	72.30%	71.46%	67.16%	6.85%	2.30
	Saliente	73.48%	71.39%	71.47%	70.21%	3.27%	1.15

Tabla 101: Valores estadísticos del indicador  $DSm$

Se aprecia que ocho de los catorce parámetros presentan como valor máximo el valor de referencia, indicando que estos parámetros presentan un carácter reductor. Por otro lado, los siete parámetros con menor desviación estándar son en los que siempre se supera el requisito mínimo del 50% de las horas diurnas.

La retícula de lamas fijas, tal como se vio en el análisis de la serie, provoca una reducción del indicador  $DSm$  hasta casi anularlo; de hecho, una retícula con un ángulo mayor de  $30^\circ$  no alcanzaría el requisito mínimo. No obstante, la proximidad de los valores de la mediana y de la media indica una distribución relativamente homogénea de los valores de la serie.

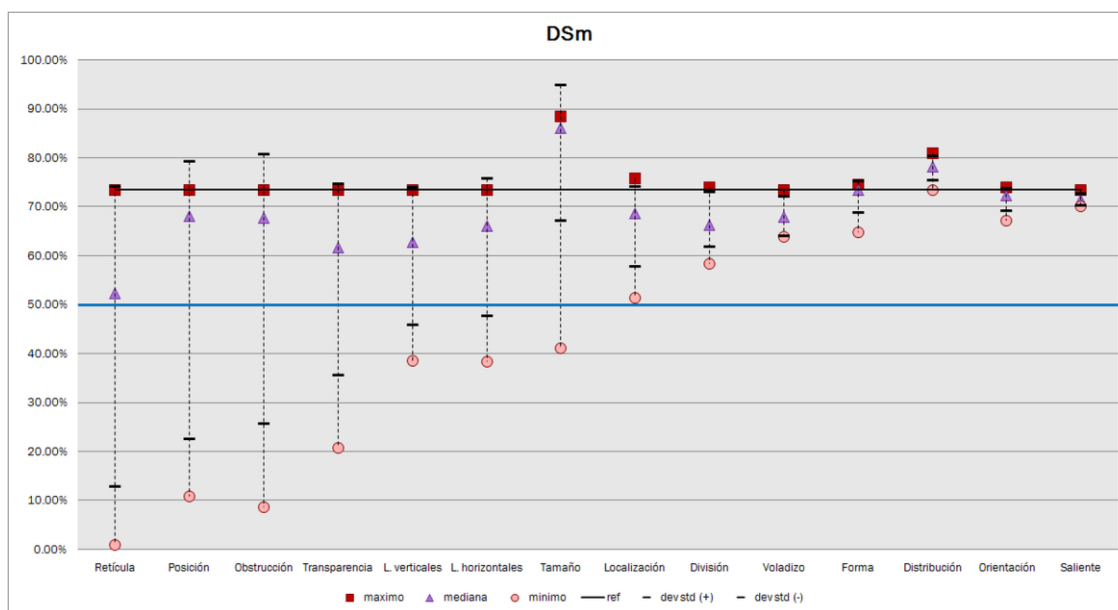


Figura 378: *DSm*. Valores estadísticos, referencia y requisito según parámetro. P.M. Esquivias

En cuanto a la posición del hueco, la proximidad de la mediana al valor máximo señala la mayor tendencia hacia valores altos. Tal como se evidenció en el análisis de la serie, los tres modelos con la posición inferior al plano de trabajo son los que reducen drásticamente las condiciones iniciales, con valores fuera del rango de la desviación estándar.

El ángulo de obstrucción y la transparencia siguen posicionándose en tercer y cuarto lugar en este indicador. En ambos casos son los dos últimos modelos de la serie los que no alcanzan el requisito mínimo. No obstante, los valores del ángulo de obstrucción son mayores que los de la transparencia tal como se puede observar en el valor de la mediana de ambos parámetros.

Las lamas fijas, tanto verticales como horizontales, presentan comportamientos muy similares en este indicador. En ambos casos, el último modelo de cada parámetro es el que no alcanza el requisito mínimo, correspondiente a un ángulo de 60°, encontrándose ambos fuera del rango de la desviación estándar. Cabe señalar el mayor valor de la mediana en las lamas fijas horizontales, que señala una mayor tendencia a obtener valores altos.

En cuanto al tamaño, de forma similar al indicador DSg, se observa que la mediana se encuentra en el entorno del valor máximo, con un valor mínimo, excepcional dentro de la serie, fuera del rango de la desviación estándar.

En el caso de la localización todos los modelos estudiados rebasan el requisito mínimo, pero sólo unos pocos mejoran las condiciones iniciales. La menor desviación estándar de esta serie hace que tanto el valor máximo como el valor mínimo se encuentren fuera de rango.

La división del hueco, si bien aumenta ligeramente las condiciones iniciales, generalmente tiende a reducir el valor de DSm, con un rango máximo del 15'57% y los demás parámetros presentan un rango de variación menor del 10%, por lo que se puede decir que tienen muy poca influencia sobre este indicador.

En este último grupo cabe señalar que, si bien la mayoría de los parámetros tienden a reducir las condiciones iniciales, en el caso de la distribución del hueco se incrementan las condiciones iniciales, especialmente si se mantiene un porcentaje de la superficie de hueco con orientación Norte.

### 4.5.2 Iluminación Natural Útil simultánea

El análisis de la *Iluminancia Natural Útil simultánea (sUDI)* se centra en aquellos rangos de iluminancias adecuados para el desarrollo de tareas visuales de baja (100-300 lux), media (300-500 lux) y alta precisión (500-3000 lux). Para cada uno de estos rangos se han obtenido los valores estadísticos de todos los parámetros estudiados, así como la desviación estándar, para determinar el impacto de cada uno de los parámetros sobre estos tres indicadores.

Además, considerando que el criterio de Iluminación Suficiente marca como límite inferior de iluminancia 300 lux, se han obtenido los valores estadísticos, incluyendo la desviación estándar, de cada uno de los parámetros para el rango de iluminancias de 300 a 3000 lux. De esta forma se obtiene el impacto de cada uno de los parámetros sobre el rango de iluminancias que actualmente la comunidad científica está adoptando como útil.

El análisis del impacto de cada parámetro se combina y matiza con los resultados obtenidos en el análisis de cada serie.

En la siguiente tabla se muestran los valores estadísticos de cada parámetro de estudio sobre el rango 100-300 lux, correspondiente a las iluminancias más adecuadas para el desarrollo de tareas visuales de baja precisión, ordenados de mayor a menor según el valor de la desviación estándar.

Valor de referencia	sUDI 100-300						
	máximo	mediana	media	mínimo	Rango	Desv. Std	
2.14%	Obstrucción	52.91%	8.80%	19.52%	1.90%	51.01%	22.53
	Retícula	45.07%	19.74%	22.36%	2.14%	42.93%	19.05
	Posición	44.23%	4.40%	14.11%	0.12%	44.11%	18.80
	Transparencia	47.92%	9.99%	17.68%	2.14%	45.78%	18.25
	L. verticales	35.67%	6.30%	12.58%	2.14%	33.53%	13.90
	L. horizontales	30.68%	5.83%	10.65%	2.14%	28.54%	11.62
	Tamaño	21.05%	0.00%	2.11%	0.00%	21.05%	6.32
	División	17.00%	2.85%	4.28%	0.36%	16.64%	5.00
	Localización	9.27%	2.79%	4.00%	2.02%	7.25%	2.36
	Orientación	8.68%	3.80%	4.54%	2.14%	6.54%	2.11
	Forma	3.57%	2.14%	1.98%	0.24%	3.33%	1.01
	Voladizo	4.40%	3.45%	3.45%	2.14%	2.26%	0.84
	Distribución	3.57%	2.62%	2.66%	1.66%	1.91%	0.78
	Saliente	2.85%	2.14%	2.34%	2.14%	0.71%	0.30

Tabla 102: Valores estadísticos de cada parámetro para *sUDI 100-300*.

Siendo el valor del modelo de referencia muy bajo, se observa que la mitad de los parámetros incrementan las condiciones iniciales, ya que el valor mínimo de la serie coincide con el valor de referencia. En general, se ha observado del análisis de las series correspondientes que normalmente se incrementa este rango de iluminancias debido a que se reduce en el plano de trabajo el porcentaje que alcanza una iluminancia mayor de 500 lux.

Por tanto, los parámetros de mayor impacto sobre este indicador pueden señalarse como elementos que pueden servir o bien para reducir un estado inicial si se incorporan una vez el edificio está construido, o bien para matizar el potencial de iluminación durante el diseño de un nuevo edificio.

La obstrucción que proporcionan los elementos del entorno es el parámetro que más influye sobre este indicador. Si bien el valor mínimo es un caso excepcional, todas las modificaciones de

esta serie incrementan este indicador, principalmente por la reducción de iluminancias superiores a 500 lux. Sin embargo, tal como muestra la mediana, la mayoría de los valores se presentan valores relativamente bajos, de hecho, son los dos últimos modelos los que proporcionan un incremento exponencial.

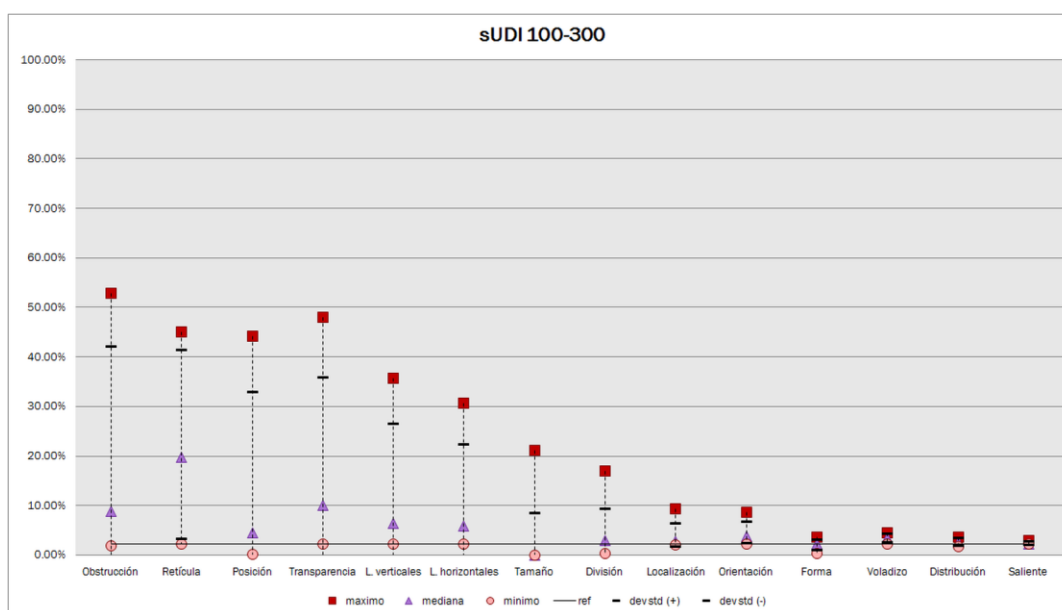


Figura 379: sUDI 100-300. Valores estadísticos y referencia según parámetro. P.M. Esquivias

En el caso de la retícula de lamas también se incrementa este rango por reducción de las iluminancias mayores de 500 lux. En esta serie, sin embargo el máximo se produce en el modelo de 45°, reduciéndose después a favor de iluminancias menores de 100 lux. En este caso, la mediana de los valores es la más alta, alrededor del 20%.

Respecto a la posición del hueco, son los modelos con superficie de ventana por debajo del plano de trabajo los que provocan los mayores incrementos de este indicador siendo el principal rango de iluminancias presente en el espacio. De hecho, la mediana se encuentra próxima al valor de referencia.

La transparencia del vidrio produce un incremento progresivo de este indicador reduciendo las iluminancias mayores de 500 lux, sin embargo a partir de una transparencia del 60% también se incrementa este indicador reduciendo las iluminancias mayores de 300 lux.

Las lamas fijas, tanto verticales como horizontales, presentan aproximadamente el mismo comportamiento. El mayor incremento se produce a partir de un ángulo de obstrucción de 45°, con un aumento moderado hasta un ángulo de 30°. El valor de la mediana confirma que la mayoría de los valores se encuentran próximos al valor de referencia.

En el caso del tamaño de la ventana se observa que tanto el mínimo como la mediana son cero porque en la serie sólo los dos primeros modelos proporcionan valores en este indicador. Es decir, el incremento de este indicador se debe exclusivamente a la reducción de la superficie acristalada.

Del análisis de la división del hueco se obtiene que si se mantiene la altura del hueco apenas se producen modificaciones en este indicador. En las otras dos variantes, aumenta cuanto más se divide el hueco, pero sin grandes repercusiones ya que la mediana de los valores se mantiene alrededor del valor de referencia.

En cuanto a la localización, se observa que a medida que aumenta la latitud aumenta este indicador, aunque no de forma lineal, lo que demuestra que intervienen otros factores de carácter



climático sobre las condiciones de iluminación natural. Además, se observa que el rango de variación es menor del 10% y su desviación estándar menor de 2'50, es decir, que su efecto es apenas perceptible.

Del mismo modo, se quedan en las últimas posiciones de influencia los siguientes parámetros: la orientación, la forma del hueco, la presencia de un voladizo, la distribución del hueco en diferentes paramentos y la incorporación de un saliente lateral. Aunque cada uno de estos parámetros tiene un efecto diferente sobre este indicador, su relevancia es tan pequeña que apenas provoca modificaciones sobre el resultado final.

Atendiendo al rango de iluminancias más adecuado para el desarrollo de tareas visuales de media precisión se obtiene el impacto de cada uno de los parámetros sobre este indicador mediante su ordenación en función del valor de la desviación estándar.

Valor de referencia	sUDI 300-500						
	máximo	mediana	media	mínimo	Rango	Desv. Std	
9.51%	Orientación	36.98%	17.54%	19.69%	8.20%	28.78%	10.08
	Retícula	20.33%	14.27%	11.98%	0.00%	20.33%	7.73
	Voladizo	25.56%	18.07%	18.05%	9.51%	16.05%	6.45
	L. horizontales	24.61%	18.19%	18.05%	9.51%	15.10%	6.15
	Tamaño	18.19%	0.00%	2.58%	0.00%	18.19%	5.90
	Transparencia	23.31%	19.14%	17.38%	9.51%	13.80%	5.21
	Obstrucción	23.31%	14.33%	15.16%	9.51%	13.80%	4.70
	Posición	14.98%	8.44%	7.83%	3.09%	11.89%	4.61
	División	23.19%	17.48%	17.09%	9.51%	13.68%	4.37
	L. verticales	18.79%	15.46%	14.39%	9.51%	9.28%	3.55
	Distribución	19.26%	14.98%	14.70%	9.51%	9.75%	3.27
	Forma	14.74%	10.70%	11.22%	9.27%	5.47%	1.72
	Localización	13.67%	9.48%	9.97%	8.20%	5.47%	1.52
	Saliente	11.65%	11.06%	11.00%	9.51%	2.14%	0.62

Tabla 103: Valores estadísticos de cada parámetro para sUDI 300-500.

En general se observa que este indicador es bastante estable a lo largo de los diferentes parámetros de estudio, con una desviación estándar máxima de aproximadamente 10 unidades. La mayor variación la provoca la orientación con un rango de aproximadamente el 30%.

Más de la mitad de los parámetros de estudio incrementan las condiciones iniciales, ya que el valor mínimo coincide con el valor de referencia. En la mayoría de los casos el valor de la mediana se encuentra alrededor del 15% mostrando el leve incremento de las condiciones iniciales que proporcionan cada uno de los parámetros.

Respecto a la orientación se ha observado que a medida que la orientación se aproxima al Norte, más se incrementa este indicador, reduciéndose el rango de iluminancias mayor de 500 lux. Los tres casos alrededor del Norte representan valores fuera del rango normal por exceso y los tres casos alrededor del Sursureste también se encuentran fuera de rango por defecto.

La retícula de lamas fijas es capaz tanto de aumentar como disminuir las condiciones iniciales. Si bien partiendo del modelo de referencia se incrementa este indicador hasta su máximo con un ángulo de obstrucción de 30° luego se reduce hasta anularse. El voladizo y las lamas fijas horizontales presentan un comportamiento y valores similares, por lo que a efectos de este indicador pueden considerarse semejantes.

Al igual que con el rango de 100 a 300 lux, se observa que tanto el mínimo como la mediana son cero porque en la serie sólo los tres primeros modelos proporcionan valores en este indicador. En este caso también el incremento de este indicador se debe exclusivamente a la reducción de la superficie acristalada.

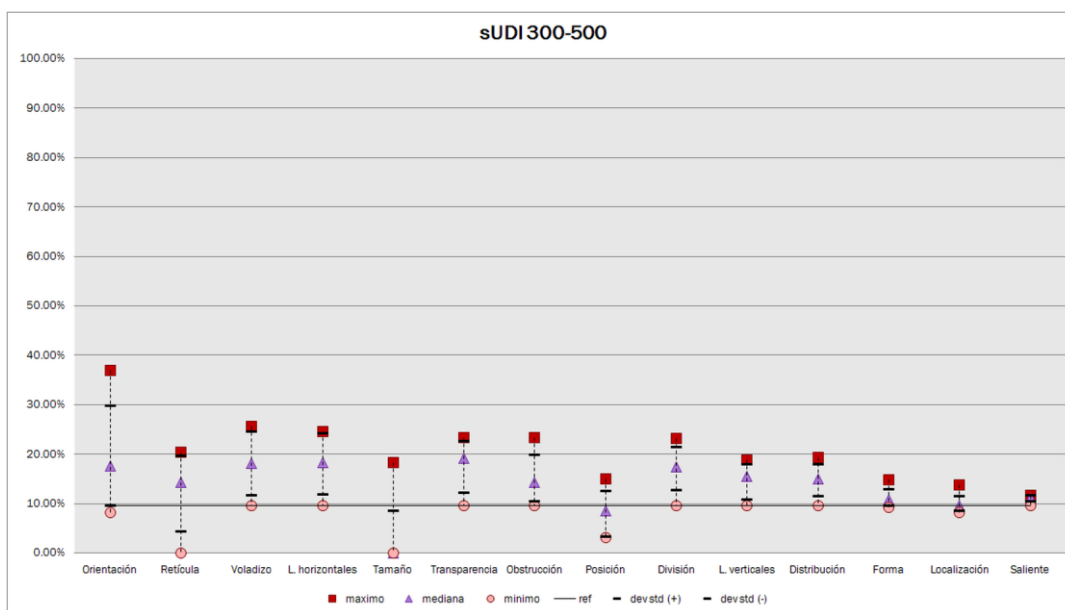


Figura 380: sUDI 300-500. Valores estadísticos y referencia según parámetro. P.M. Esquivias

La obstrucción del entorno y la transparencia también presentan comportamientos similares en lo referente a su influencia sobre este indicador, aunque se diferencian entre sí en que la transparencia tiende a incrementar las condiciones iniciales, mientras que la mediana del ángulo de obstrucción permanece próxima al valor de referencia.

En el caso de la posición, tanto los modelos de posición superior como de posición inferior reducen las condiciones iniciales, por lo que la mediana resultante se encuentra por debajo del valor de referencia. En este caso, el incremento se debe exclusivamente a la utilización de las paredes laterales en posición central de elementos reflectantes de la luz natural captada por el hueco.

Los demás parámetros apenas ejercen influencia sobre este indicador, por lo que son susceptibles de modificarse con libertad si el diseño de las condiciones de iluminación se centra exclusivamente en el rango de iluminancias comprendidas entre 300 y 500 lux.

En la siguiente tabla se muestran los valores estadísticos de cada parámetro de estudio sobre el rango 500-3000 lux, correspondiente a las iluminancias más adecuadas para el desarrollo de tareas visuales de alta precisión, ordenados de mayor a menor según el valor de la desviación estándar.

En general se observa que este indicador es susceptible de sufrir grandes variaciones, por lo que los parámetros que ejercen mayor influencia deberán tenerse en especial consideración a la hora de diseñar las condiciones de iluminación natural de los nuevos edificios así como a la hora de adoptar medidas correctoras si se trata de la rehabilitación de un edificio existente.

Más de la mitad de los parámetros estudiados reducen las condiciones iniciales ya que el valor máximo coincide con el valor de referencia.

En primer lugar de influencia se encuentra la posición del hueco. En el análisis de este parámetro se evidencia que si se mueve el hueco a posiciones superiores se incrementa este

indicador, pero que si se mantiene en posición central trasladando el hueco hacia los paramentos o moviendo el hueco a posiciones inferiores se reduce el valor de este indicador. Es por ello que el valor de la mediana se posiciona por debajo del valor de referencia, con valor similar a las posiciones centrales del hueco.

Valor de referencia	sUDI 500-3000						
	máximo	mediana	media	mínimo	Rango	Desv. Std	
58.50%	Posición	70.87%	44.23%	38.63%	4.28%	66.59%	27.09
	Retícula	58.50%	19.98%	25.04%	0.00%	58.50%	26.32
	Tamaño	67.78%	24.73%	30.55%	0.12%	67.66%	25.72
	L. horizontales	58.50%	42.81%	36.43%	3.69%	54.81%	22.17
	L. verticales	58.50%	40.07%	39.38%	16.88%	41.62%	17.61
	Transparencia	58.50%	31.03%	33.60%	11.06%	47.44%	17.50
	Obstrucción	58.50%	38.65%	37.26%	14.27%	44.23%	17.22
	División	59.45%	42.57%	45.53%	28.66%	30.79%	10.47
	Localización	58.50%	50.06%	47.15%	28.42%	30.08%	9.55
	Voladizo	58.50%	44.35%	45.63%	36.62%	21.88%	8.79
	Orientación	58.50%	46.79%	45.50%	34.24%	24.26%	8.60
	Forma	62.31%	58.50%	55.01%	39.60%	22.71%	7.28
	Distribución	69.56%	64.09%	64.24%	58.50%	11.06%	3.45
	Saliente	58.50%	56.36%	55.60%	51.13%	7.37%	2.55

Tabla 104: Valores estadísticos de cada parámetro para sUDI 500-3000.

La retícula de lamas fijas es capaz de reducir el valor de este indicador hasta anularlo. En este caso, mientras los primeros modelos producen una reducción moderada, a partir de un ángulo de 30° se reduce drásticamente el valor de este indicador, reflejándose en el valor de la mediana.

En el caso del tamaño del hueco, el incremento del valor de este indicador se debe a un aumento de la superficie de hueco de hasta el 30%, mientras que los demás modelos reducen este indicador a favor de iluminancias mayores de 3000 lux en caso de aumentar el hueco, y a favor de iluminancias menores en caso de reducir el tamaño del hueco.

Las lamas fijas horizontales muestran un comportamiento similar a la retícula de lamas fijas, salvo que no llega a anular el valor de este indicador. El progresivo incremento del ángulo de obstrucción de las lamas redundará en una progresiva reducción de este indicador, salvo el caso de 60° que es quien produce una drástica reducción del mismo. Es por ello que el valor de la mediana se mantiene próximo al valor de referencia.

En el caso de las lamas fijas verticales se mantiene este mismo comportamiento salvo que la reducción drástica de valores se produce a partir de un ángulo de obstrucción de 45°, por lo que la mediana tiene un valor más bajo que en el caso anterior aunque el valor mínimo sea más alto.

La transparencia y la obstrucción del entorno se mantienen como parámetros parejos. Aunque con diferencias cuantitativas, a medida que disminuye la transparencia o aumenta el ángulo de obstrucción del entorno, se reduce de forma progresiva el valor de este indicador. Es por ellos que el valor de la mediana se presenta próximo al valor de la media.

La división del hueco y la localización también presentan comportamientos similares en sus valores extremos. Sin embargo, el hecho de dividir el hueco provoca un ligero incremento de las condiciones iniciales, hecho que se debe exclusivamente a la división en dos del hueco, manteniendo la altura del mismo. En el caso de la división del hueco, apenas se producen

variaciones si se mantiene la altura del hueco, pero se producen reducciones de cierta entidad si parte de la superficie acristalada se encuentra por debajo del plano de trabajo.

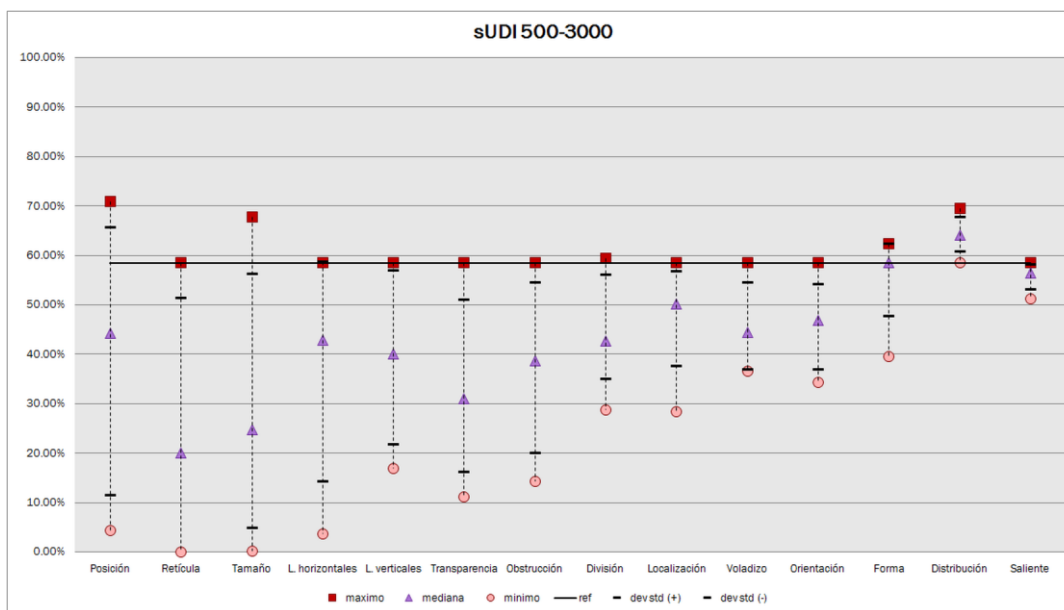


Figura 381: sUDI 500-3000. Valores estadísticos y referencia según parámetro. P.M. Esquivias

En el caso de la localización la reducción de valores resulta progresiva, lo cual se evidencia por la proximidad del valor de la mediana y de la media. Este mismo comportamiento se presenta en el caso del voladizo y la orientación: se produce una distribución relativamente homogénea de los valores por lo que la mediana y la media tienen valores parecidos.

La forma del hueco y la distribución del hueco en paramentos matizan las condiciones iniciales. En el caso de la forma del hueco, pese a se incrementa ligeramente el valor de referencia, principalmente se reduce su valor. Sin embargo, la mediana de los valores coincide con el valor de referencia, lo que enfatiza su carácter matizador. En el caso de la distribución del hueco, todos los modelos repercuten en el aumento del valor de referencia, pero sin apenas influencia.

En último lugar se encuentra el saliente lateral, que apenas produce modificaciones sobre este indicador, tal como se evidenció en el análisis de esta serie.

Aunque se ha analizado el impacto de cada parámetro sobre los indicadores correspondientes con la obtención de forma simultánea en el plano de trabajo de iluminancia natural adecuada para el desarrollo de tareas visuales de baja, media y alta precisión, en la actualidad la iluminancia mínima que se debe obtener para considerar un espacio iluminado naturalmente es de 300 lux.

Este objetivo luminotécnico, además, debe alcanzarse durante el 50% de las horas diurnas ofreciendo una cobertura del plano de trabajo de, al menos, el 50%. En este sentido se han obtenido las medianas de los valores horarios diurnos para cada uno de los modelos para un rango comprendido entre 300 y 3000 lux, para descartar aquellas iluminancias que resultan excesivas para el desarrollo de las tareas visuales y que pueden dar lugar a situaciones de deslumbramiento. Es por ello que la obtención de una iluminancia entre 300 y 3000 lux durante el 50% del tiempo para una cobertura del 50% puede definirse como el *criterio de iluminación natural útil suficiente*.

Atendiendo a este rango de iluminancias se muestra en la siguiente tabla y figura los parámetros de estudio ordenados de mayor a menor según el valor de su desviación estándar. Estos parámetros, por tanto, deben tenerse en cuenta para un adecuado diseño de la iluminación natural

de los espacios atendiendo a su naturaleza y a su ubicación dentro del proceso de diseño arquitectónico.

En general, se observa que la mitad de los parámetros de estudio presentan un carácter reductor sobre este indicador, ya que su máximo coincide con el valor de referencia. Además, la mitad de estos parámetros, pese a su impacto sobre este indicador, mantienen todos sus valores por encima del requisito mínimo de 50%.

Valor de referencia	sUDI 300-3000						
	máximo	mediana	media	mínimo	Rango	Desv. Std	
80.38%	Posición	85.97%	74.91%	56.31%	7.49%	78.48%	36.66
	Retícula	80.38%	56.24%	46.02%	0.00%	80.38%	36.61
	Tamaño	80.38%	38.76%	36.59%	0.59%	79.79%	28.81
	Obstrucción	80.38%	68.67%	60.50%	28.30%	52.08%	22.80
	L. horizontales	80.38%	79.31%	69.11%	29.60%	50.78%	22.13
	Transparencia	80.38%	66.95%	59.98%	26.04%	54.34%	21.08
	L. verticales	80.38%	73.96%	65.35%	34.60%	45.78%	18.95
	Localización	81.81%	76.28%	72.37%	52.92%	28.90%	8.88
	División	81.68%	75.39%	74.40%	60.76%	20.92%	6.75
	Orientación	85.73%	79.55%	79.77%	75.98%	9.75%	2.32
	Distribución	85.97%	85.08%	83.92%	80.38%	5.59%	2.10
	Forma	81.34%	80.14%	79.90%	78.00%	3.34%	1.09
	Voladizo	80.38%	79.55%	79.69%	78.95%	1.43%	0.61
	Saliente	80.85%	80.02%	80.13%	79.67%	1.18%	0.40

Tabla 105: Valores estadísticos de cada parámetro para sUDI 300-3000.

En lo relativo al impacto sobre este indicador se distinguen cuatro grupos. El primero, con una desviación estándar próxima a 32 se compone de la posición del hueco, la retícula de lamas y el tamaño del hueco. El segundo grupo comprende a los parámetros obstrucción del entorno, transparencia y los dispositivos de lamas fijas, verticales y horizontales. En tercer lugar se encuentra el grupo compuesto por la localización y la división del hueco. Por último, sin especial influencia sobre este indicador se encuentran la orientación, la distribución del hueco, la forma del mismo, la incorporación de un voladizo o de un saliente lateral.

Al igual que en el rango 500-3000 lux, en primer lugar de influencia se encuentra la posición del hueco. Tal como se comentó anteriormente, en el análisis de este parámetro se evidencia que si se mueve el hueco a posiciones superiores se incrementa este indicador, pero que si se mantiene en posición central trasladando el hueco hacia los paramentos o moviendo el hueco a posiciones inferiores se reduce el valor de este indicador. En esta ocasión el valor de la mediana también se posiciona por debajo del valor de referencia, con valor similar a las posiciones centrales del hueco, siendo muy superior al requisito mínimo.

La retícula de lamas fijas provoca la reducción de este indicador hasta anularlo. Sin embargo esta reducción no es homogénea, siendo moderada en los primeros modelos y con mayor pendiente a partir de un ángulo de 30°. Cabe señalar que la mediana de los valores se encuentra por encima del requisito mínimo y el valor mínimo se encuentra fuera de rango de la desviación estándar.

En el caso del tamaño del hueco a medida que aumenta la superficie acristalada, se reduce el valor de en este rango a favor de iluminancias excesivas. En el supuesto que se reduzca la superficie de hueco, la reducción se realiza a favor del rango de 100 a 300 lux. No obstante, el valor de la

mediana se encuentra muy próximo al de la media, denotando la homogeneidad en la distribución de los valores, aunque ninguno de estos valores supera el requisito mínimo.

La obstrucción del entorno provoca una reducción moderada en este rango que se enfatiza a partir de un ángulo de 45°, siendo menor de 50% a partir de 60°. Sin embargo, debido a los altos valores de los primeros modelos, la mediana se mantiene alrededor del 70%, cercano de la media.

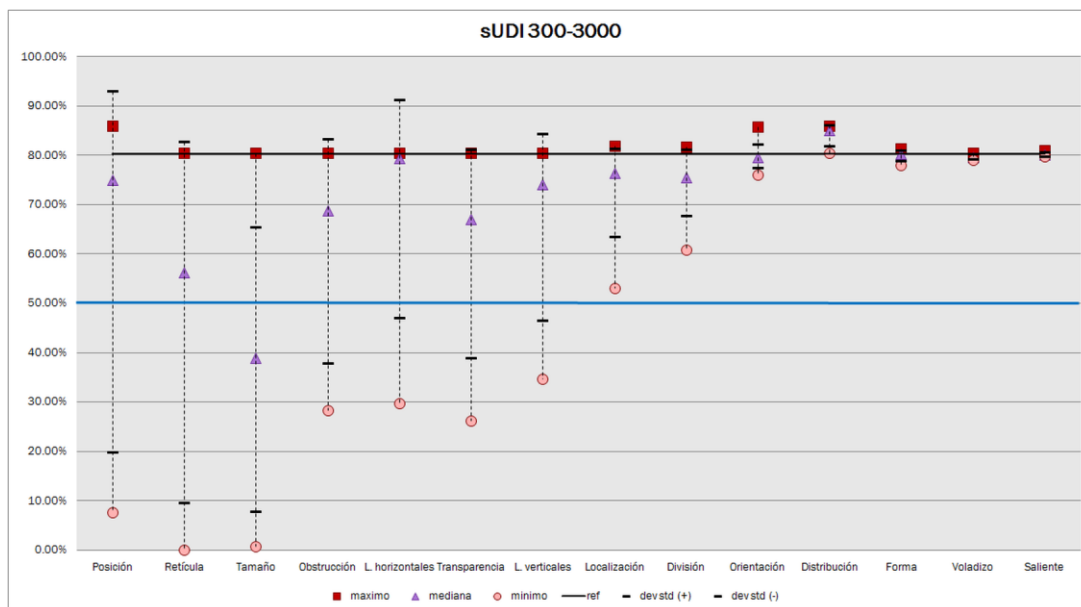


Figura 382: sUDI 300-3000. Valores estadísticos, referencia y requisito según parámetro. P.M. Esquivias

En lo que respecta a las lamas horizontales apenas se sufren cambios salvo en el último modelo que es quien realmente reduce el valor de este indicador. Este hecho se refleja en que la mediana de los valores está prácticamente en el valor máximo.

La transparencia del vidrio provoca una reducción progresiva de los valores, generalmente a favor del rango de iluminancias 100-300 lux. Los dos últimos modelos no alcanzan el requisito mínimo, sin embargo el valor de la mediana se encuentra por encima de éste.

En el caso de las lamas verticales también se produce un comportamiento similar, reduciéndose progresivamente a medida que aumenta el ángulo de obstrucción de las mismas. Sólo el último modelo no alcanza el requisito mínimo, estando, además, fuera del rango de la desviación estándar.

La localización y la división del hueco, con desviaciones estándar parecidas, tienen todos sus modelos por encima del requisito mínimo, con similares valores de la mediana. En el caso de la localización, se reduce el valor en este rango con las latitudes más altas. En el caso de la división del hueco, se reduce a medida que existe superficie acristalada por debajo del plano de trabajo.

Por último se encuentra el grupo formado por la orientación, la distribución del hueco, la forma del hueco, el voladizo y el saliente lateral. Estos parámetros apenas provocan variaciones en este indicador, revelando su bajo impacto sobre el mismo.

### 4.5.3 Excesiva radiación solar

En el ámbito de esta investigación, se ha definido la *Insolación Excesiva (SHGe)* como el porcentaje horas diurnas en que se supera una ganancia solar a través de los huecos exteriores tal que suponga una cierta certeza de que los ocupantes actuarán sobre los dispositivos de protección para evitar bien situaciones de deslumbramiento como situaciones de sobrecalentamiento del espacio.

Es decir, en este trabajo se considera el efecto térmico de una sobreexposición a la radiación solar y se correlaciona con la *Iluminancia Natural Útil simultánea excesiva (sUDI<sub>>3000</sub>)*, ya que este indicador señala cierta certeza de aparición de situaciones de deslumbramiento.

En la definición de los objetivos ambientales, por tanto, para buscar el confort de los usuarios, ambos indicadores deben ser minimizados hasta alcanzar un valor máximo. Si bien los valores límite para los indicadores de *Suficiencia de Iluminación Natural* se han discutido en la comunidad internacional y se ha incorporado a la investigación, no existen valores límites relativos a la excesiva radiación solar.

A lo largo del análisis de los diferentes parámetros se ha observado la relación de valores que guardaban ambos indicadores con el objetivo de poder establecer finalmente el criterio que permita emitir un juicio sobre la *insolación excesiva*, para minimizar la probabilidad de aparición de situaciones de deslumbramiento. En este sentido, se ha observado que cuando el indicador *SHGe* alcanzaba un valor menor o igual de 40% el indicador *sUDI<sub>>3000</sub>* era prácticamente nulo.

Considerando, por tanto, este valor máximo de *SHGe*, se analiza el impacto de cada uno de los parámetros de estudio sobre este indicador, así como sobre el indicador *sUDI<sub>>3000</sub>* a través del análisis de sus valores extremos y centrales.

En la siguiente tabla se muestran los diferentes parámetros y sus valores estadísticos ordenados de mayor a menor en función del valor de la desviación estándar respecto al indicador *SHGe*.

Valor de referencia	SHGe						
	máximo	mediana	media	mínimo	Rango	Desv. Std	
53.43%	Transparencia	53.43%	20.67%	26.05%	3.48%	49.95%	19.48
	Tamaño	88.47%	83.75%	75.41%	30.51%	57.95%	18.18
	Retícula	53.43%	38.20%	34.96%	11.68%	41.75%	17.05
	Obstrucción	53.43%	45.71%	38.64%	11.19%	42.24%	16.59
	Orientación	53.43%	34.80%	32.16%	2.82%	50.61%	16.39
	L. horizontales	53.43%	46.72%	43.19%	26.27%	27.16%	11.28
	Voladizo	53.43%	36.28%	38.23%	27.59%	25.84%	10.34
	Localización	54.68%	45.68%	43.46%	28.51%	26.17%	8.84
	L. verticales	53.43%	45.12%	44.57%	33.97%	19.45%	7.92
	Distribución	64.34%	55.22%	55.53%	45.78%	18.56%	5.73
	Saliente	53.43%	48.84%	49.58%	48.32%	5.10%	1.63
	Posición	53.43%	53.15%	53.10%	52.62%	0.81%	0.30
	Forma	53.53%	53.43%	53.34%	52.83%	0.70%	0.22
	División	53.68%	53.43%	53.43%	53.19%	0.49%	0.14

Tabla 106: Valores estadísticos de cada parámetro para *SHGe*

Se puede apreciar que la mayoría de los parámetros de estudio reducen el valor inicial ya que el valor máximo coincide con el valor de referencia. También se aprecia que sólo cuatro de estos parámetros presentan la mayor parte de sus modelos por debajo del requisito máximo de 40%.

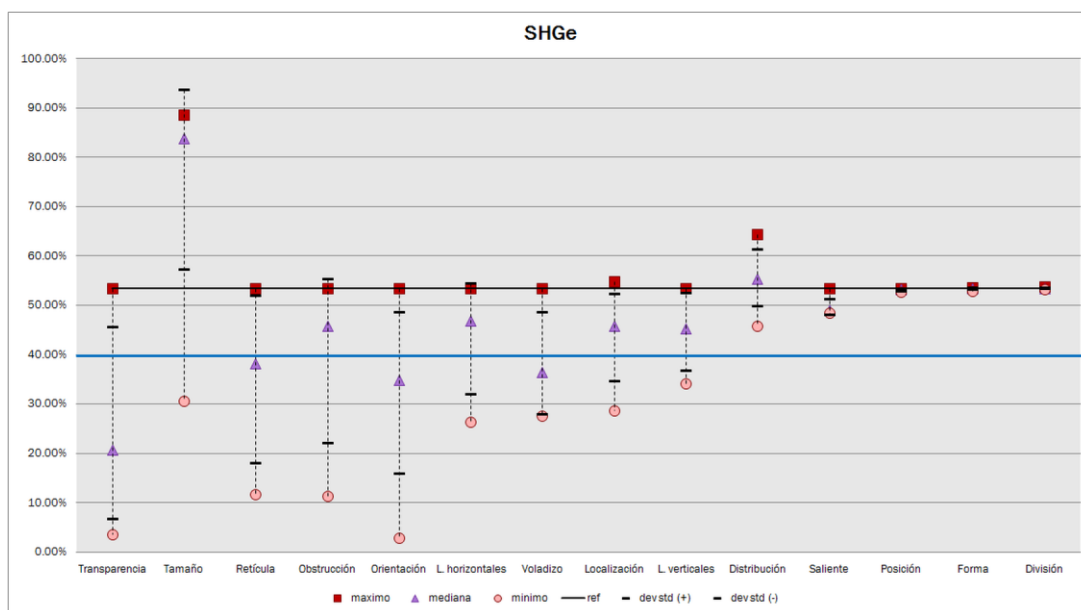


Figura 383: SHGe. Valores estadísticos, referencia y requisito según parámetro. P.M. Esquivias

Aunque la transparencia no presenta el mayor rango de variación, sí presenta el mayor valor de la desviación estándar. En el análisis de la serie se observa que la reducción de la transparencia del vidrio lleva aparejada también una reducción del *coeficiente de ganancias solares* del mismo. Es por ello que a medida que se reduce la transparencia del vidrio se reduce el valor de este indicador. De hecho, a partir de una transparencia del 70% los modelos se encuentran por debajo del requisito máximo, por lo que la mediana de los valores también se encuentra por debajo del límite máximo.

En el caso del tamaño del hueco el comportamiento es inverso, a medida que aumenta la superficie acristalada aumenta el valor de este indicador, siendo el valor mínimo debido exclusivamente a la reducción del tamaño del hueco. Tal como se puede apreciar el valor de la mediana se encuentra próximo al máximo, evidenciando el fuerte crecimiento de este indicador en esta serie.

La retícula de lamas reduce el valor de este indicador a medida que aumenta el ángulo de obstrucción aunque sin llegar a anularlo. A partir de un ángulo de 30° los valores se encuentran por debajo del requisito máximo, estando la mediana de los valores próxima al mismo.

El ángulo de obstrucción del entorno también reduce las condiciones iniciales pero de forma más suave que la retícula de lamas. Sólo en los dos últimos modelos se obtiene un SHGe menor de 40%. La mediana, sin embargo, se encuentra por encima del requisito máximo.

En el caso de la orientación se produce un amplio rango de variación con el máximo en el modelo de referencia y se reduce a medida que la orientación se aproxima al Norte, tal como pudiera esperarse. De hecho, el rango de modelos comprendidos entre la orientación Oeste y Este, pasando por el Norte, tienen un valor menor del límite máximo, valor que se refleja en la posición de la mediana.

Las lamas horizontales y el voladizo presentan comportamientos similares, sin embargo, la reducción que provoca el voladizo parece ser de mayor peso que el de las lamas. De hecho, para el voladizo el valor del indicador es menor de 40% a partir de 30° mientras que en el caso de las lamas horizontales es a partir de 45°. Estas diferencias se reflejan en la posición de la mediana, siendo superior al límite en las lamas, e inferior en el voladizo.



La localización, las condiciones climáticas, marcan el soleamiento que reciben los espacios. Es por ello que en climas más nublados se reduzca el valor de este indicador. Sin embargo, estas reducciones no tienen tanto peso ni son tan numerosas como para que la mediana de los valores sea menor que el requisito máximo.

Con las lamas verticales también se reducen las condiciones iniciales, estando los dos últimos modelos por debajo del límite máximo. No obstante, el rango de variación en esta serie ya es bastante reducido y su efecto sobre este indicador limitado.

En el caso de la distribución del hueco en diferentes paramentos sólo se reducen las condiciones iniciales en el modelo con orientaciones Norte-Sur, en el resto se aumenta el valor de este indicador. Esto se debe a que la presencia de huecos en las diferentes orientaciones permite 'ver' más porciones de la trayectoria solar, captando, de este modo, radiación solar directa durante más horas diarias.

Por último, el saliente lateral, la posición del hueco, su forma o la división del mismo muestran no ejercer apenas influencia sobre este indicador, por lo que los valores se encuentran alrededor del valor de referencia, por tanto, por encima del requisito máximo.

En cuanto a la iluminación natural excesiva, se muestra en la siguiente tabla los valores estadísticos de los diferentes parámetros de estudio, ordenados de mayor a menor según el valor de la desviación estándar.

Valor de referencia	sUDI >3000						
	máximo	mediana	media	mínimo	Rango	Desv. Std	
6.06%	Tamaño	95.12%	43.52%	46.19%	0.00%	95.12%	33.35
	Obstrucción	6.06%	5.30%	3.96%	0.00%	6.06%	2.72
	Localización	7.02%	4.40%	3.70%	0.00%	7.02%	2.70
	L. verticales	6.06%	0.00%	1.76%	0.00%	6.06%	2.68
	Retícula	6.06%	0.00%	1.33%	0.00%	6.06%	2.66
	Posición	6.06%	1.19%	2.30%	0.00%	6.06%	2.61
	L. horizontales	6.06%	0.36%	1.69%	0.00%	6.06%	2.56
	Orientación	6.06%	0.00%	1.54%	0.00%	6.06%	2.43
	Transparencia	6.06%	3.33%	3.12%	0.00%	6.06%	2.31
	Voladizo	6.06%	2.26%	3.07%	1.66%	4.40%	1.84
	Distribución	6.90%	4.99%	4.53%	2.02%	4.88%	1.66
	División	6.06%	3.92%	3.48%	1.07%	4.99%	1.46
	Forma	6.78%	5.83%	5.10%	2.85%	3.93%	1.34
	Saliente	6.06%	4.28%	4.50%	3.69%	2.37%	0.76

Tabla 107: Valores estadísticos de cada parámetro para sUDI >3000

El parámetro que mayor desviación produce es el tamaño de la ventana mientras que en los demás parámetros se obtiene una desviación menor de 5 puntos, por lo que apenas se produce un impacto relevante. Sin embargo cabe señalar que el valor de referencia es bastante bajo y que la mayoría de los parámetros reducen las condiciones iniciales, por lo que como máximo tienen un rango de variación del 6%. De hecho, la mitad de los parámetros llegan a anular el valor de este parámetro en su valor mínimo.

El tamaño del hueco es el parámetro que mayor impacto ejerce sobre este indicador, incrementando principalmente las condiciones iniciales. Si bien podría llegar a ser admisible una cobertura de hasta el 10% del plano de trabajo [126], más de la mitad de los modelos de esta serie

proporcionan unos valores mayores del 40%, por lo que la mayoría de las opciones de diseño que manejan grandes superficies de ventana serían en un principio descartadas.

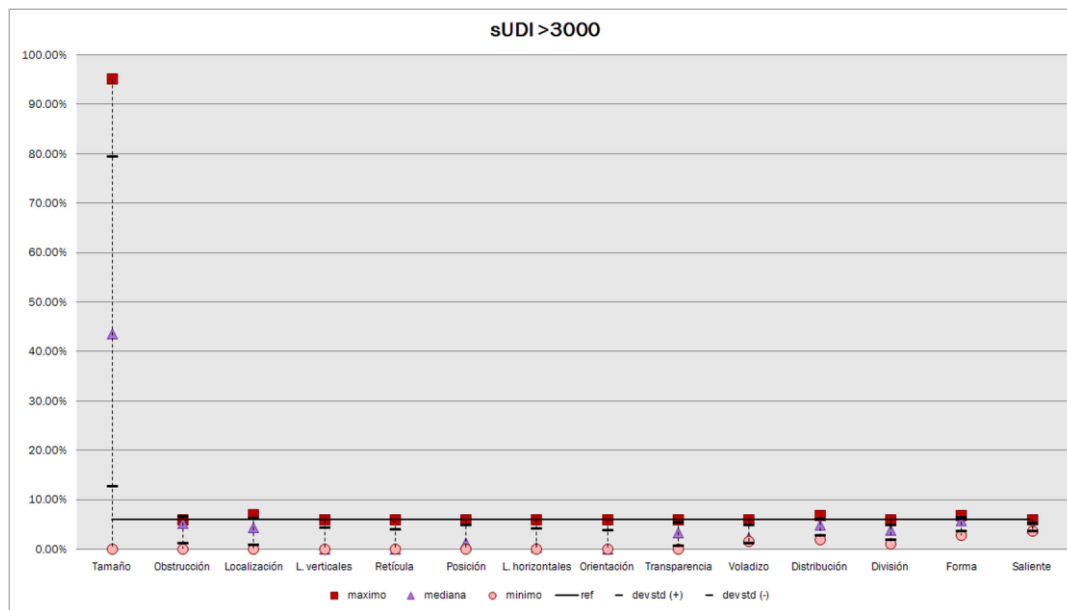


Figura 384: *sUDI > 3000*. Valores estadísticos y referencia según parámetro. P.M. Esquivias

La localización es el otro parámetro que produce un incremento de las condiciones iniciales, aunque éste es muy leve, estando por debajo del 10% admisible.

Considerando los valores se distinguen cuatro grupos de orden de impacto: en el primero se encontraría el tamaño del hueco y en segundo lugar la localización. En el tercer grupo se engloban aquellos parámetros que no aumentan las condiciones iniciales pero que llegan a anular el valor de este indicador. Dentro de este grupo se encuentran el ángulo de obstrucción frontal, la orientación, la transparencia del hueco, la posición del mismo, las lamas fijas horizontales, las lamas fijas verticales y la retícula de lamas.

Cabe señalar que, salvo para la transparencia del vidrio, la mediana de los valores se encuentra muy próxima al valor máximo, indicando un menor impacto en los valores próximos al modelo de referencia. Si bien en el caso de la transparencia del hueco se produce una mayor homogeneidad en la reducción de este indicador a través de los diferentes modelos de la serie.

Por último se encuentran aquellos parámetros que reducen las condiciones iniciales pero que no llegan a anular el valor de este indicador, obteniendo, por tanto, una menor influencia sobre el mismo. En este grupo se encuentran la división del hueco, la distribución del hueco y el voladizo, seguidos por la forma del hueco y el saliente lateral, que ocuparían la última posición.

#### 4.5.4 Iluminación insuficiente

Uno de los objetivos luminotécnicos es minimizar el porcentaje del plano de trabajo que tiene una iluminancia natural menor de 100 lux para evitar la necesidad de una iluminación artificial de estas zonas de forma permanente a lo largo del año. Este objetivo está relacionado con el indicador *Iluminancia Natural Útil simultánea* para el rango menor de 100 lux.

En la siguiente tabla se muestran los valores estadísticos de los parámetros de estudio, ordenados de mayor a menor según el valor de la desviación estándar.

Valor de referencia	sUDI <100				Rango	Desv. Std
	máximo	mediana	media	mínimo		
Retícula	61.47%	2.62%	15.39%	0.00%	61.47%	26.30
L. verticales	6.30%	0.12%	1.66%	0.00%	6.30%	2.71
Obstrucción	4.28%	0.00%	0.85%	0.00%	4.28%	1.71
Transparencia	3.21%	0.12%	0.78%	0.00%	3.21%	1.23
L. horizontales	2.38%	0.00%	0.48%	0.00%	2.38%	1.06
Tamaño	1.90%	0.00%	0.17%	0.00%	1.90%	0.57
Localización	1.55%	0.00%	0.27%	0.00%	1.55%	0.50
Posición	0.24%	0.00%	0.04%	0.00%	0.24%	0.08
Orientación	0.24%	0.00%	0.04%	0.00%	0.24%	0.08
Forma	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00
División	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00
Distribución	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00
Voladizo	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00
Saliente	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00

Tabla 108: Valores estadísticos de cada parámetro para sUDI<100

Tal como se puede observar, debido a que el valor del modelo de referencia es 0%, todos los parámetros, en su rango de variación, presentan un comportamiento positivo, es decir, aumentan las condiciones iniciales.

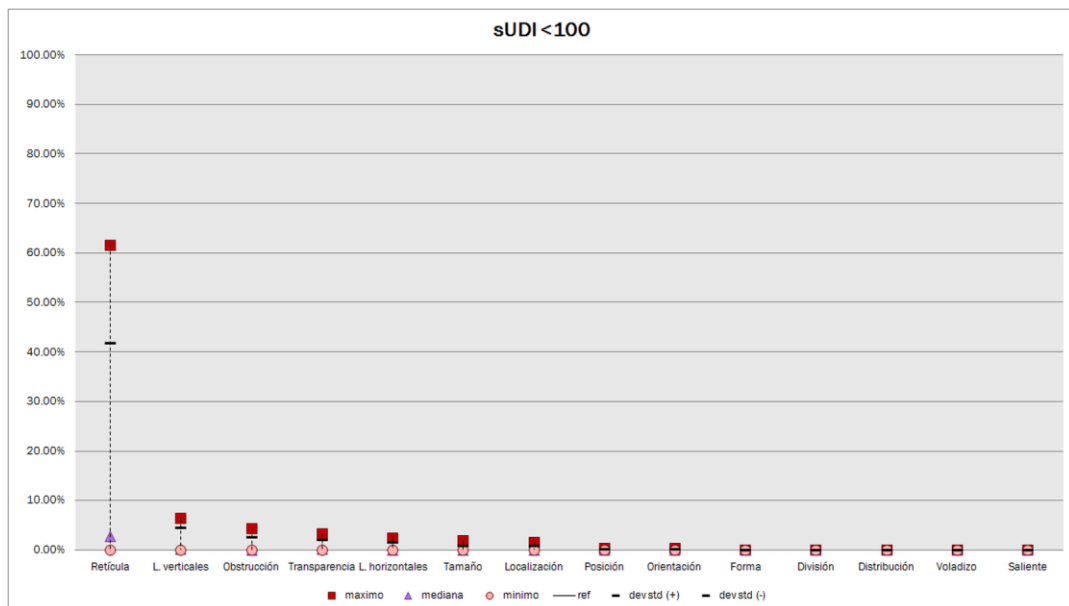


Figura 385: sUDI<100. Valores estadísticos y referencia según parámetro. P.M. Esquivias

Sin embargo, salvo el caso de la retícula de lamas fijas, el incremento que provocan estos parámetros es muy leve, no llegando al 10% de cobertura del plano de trabajo de mediana anual.

Tal como se comentó en el análisis de la serie y como se puede apreciar en la posición de la mediana, la mayoría de los modelos de retícula de lamas, apenas ejercen influencia sobre este indicador siendo el modelo más extremo el que dispara el valor hasta cubrir más del 50%.

## 4.6 Análisis global

Por último, se realiza el análisis conjunto del impacto de los parámetros estudiados sobre los indicadores propuestos, expresado a través de la desviación estándar. Además, se obtiene, para los indicadores para los que se define un valor requisito, el incremento neto en cada parámetro de estudio, para conocer si, en global, el parámetro tiene un efecto positivo o negativo.

Aplicando el *criterio de iluminación suficiente* es posible determinar el valor mínimo que deben alcanzar determinados indicadores. Además, en base a los resultados, se ha podido establecer el valor máximo que debe alcanzar el indicador de *Insolación excesiva (SHGe)* para reducir a su mínima expresión la probabilidad de aparición de situaciones de deslumbramiento, sin llegar a comprometer las condiciones de iluminación natural del espacio. Estos requisitos son:

- Valor mínimo de 50% del plano de trabajo: se aplica a los indicadores *Suficiente Iluminación Natural global (DSg)* y *difusa (DSd)* y a la obtención simultánea de iluminancias comprendidas entre 300 y 3000 lux (*sUDI<sub>300-3000</sub>*)
- Valor mínimo de 50% de horas diurnas: se aplica al indicador *Suficiente Iluminación Natural mantenida (DSm)*
- Valor máximo de 40% de horas diurnas: se aplica al indicador *Insolación excesiva (SHGe)*

Una vez analizada la desviación estándar de cada parámetro sobre cada uno de los indicadores se puede analizar de forma conjunta esta información. En la siguiente tabla se muestran los parámetros de estudio ordenados según su impacto sobre los indicadores de iluminación natural e insolación que tienen definido un requisito luminotécnico.

sUDI 300-3000	DSd	DSg	DSm	SHGe
Posición	Posición	Retícula	Retícula	Transparencia
Retícula	Tamaño	Posición	Posición	Tamaño
Tamaño	Retícula	Obstrucción	Obstrucción	Retícula
Obstrucción	L. Horizontales	Transparencia	Transparencia	Obstrucción
L. Horizontales	Obstrucción	L. Horizontales	L. Verticales	Orientación
Transparencia	Transparencia	L. Verticales	L. Horizontales	L. Horizontales
L. Verticales	L. Verticales	Tamaño	Tamaño	Voladizo
Localización	Voladizo	Localización	Localización	Localización
División	División	División	División	L. Verticales
Orientación	Localización	Orientación	Voladizo	Distribución
Distribución	Distribución	Voladizo	Forma	Saliente
Forma	Forma	Forma	Distribución	Posición
Voladizo	Saliente	Distribución	Orientación	Forma
Saliente	Orientación	Saliente	Saliente	División

Tabla 109: Orden de influencia de cada parámetro sobre varios indicadores de iluminación natural e insolación

Se evidencia que la incorporación de una retícula de lamas fijas tiene un alto impacto en todos los indicadores, por lo que a la hora de incluirla en el proyecto arquitectónico debe tener una especial atención. Circunscrito al contexto de esta investigación, los resultados muestran que con un ángulo de 30° se cumplirían casi todos los requisitos. Para su aplicación a otras condiciones iniciales habrá que considerar los factores de proporcionalidad obtenidos en el análisis de esta serie.

Otro parámetro que muestra tener un gran impacto es la posición del hueco. Sobre este parámetro ya se ha comentado que los modelos que provocan este nivel de impacto son aquellos en los que el hueco se ubicaba por debajo del plano de trabajo. Sin embargo las variaciones que

producen los otros modelos sobre los diferentes indicadores son bastante moderadas. Por ello, se recomienda no ubicar los huecos en posiciones inferiores a menos que el espacio al que sirven se destine a fines donde se requieran situaciones de penumbra.

El tamaño del hueco es un parámetro con el que se requiere un cierto equilibrio. Ya se ha visto anteriormente que un defecto de superficie provoca situaciones en las que se requiere iluminación artificial de forma continua, sin embargo, aumentar la superficie del hueco también perjudica a las condiciones de iluminación natural y de soleamiento porque produce graves incrementos de la insolación del espacio, con la consecuente iluminación excesiva.

La obstrucción del entorno, la transparencia del vidrio, las lamas fijas horizontales y las lamas fijas verticales han demostrado ser parámetros con comportamientos similares. Todos ellos reducen progresivamente las condiciones de iluminación natural y de insolación, por lo que se podrán utilizar para corregir situaciones con una excesiva iluminación. Además, en el caso de la obstrucción del entorno, debe considerarse en primeras instancias para elegir un tamaño de hueco que compense el efecto de este parámetro.

Aunque estos parámetros tienen un comportamiento similar para las condiciones de iluminación natural, su efecto es diferente para las condiciones de insolación, marcando este último indicador el orden en que deben ser utilizados en función del objetivo a conseguir. En este sentido, aunque se marca un requisito máximo de *insolación excesiva*, el estudio térmico del edificio es necesario para evaluar la idoneidad de las ganancias solares para alcanzar el acondicionamiento térmico de los espacios.

La localización del edificio se posiciona casi siempre en el octavo lugar de importancia. Este parámetro en realidad es un condicionante de las condiciones de iluminación natural e insolación, por lo que, pese a que su influencia puede ser menor que otros parámetros es de los primeros a tener en cuenta porque determinará el potencial de iluminación del espacio.

En cuanto a la división del hueco, aunque también se posiciona en lugares centrales de impacto, debe tenerse en cuenta que los modelos que provocan las reducciones de las condiciones iniciales son aquellos en los que parte de la superficie del hueco está por debajo del plano de trabajo. En los demás modelos, su influencia puede ser positiva o negativa, por lo que puede decirse que es un parámetro que matiza las condiciones iniciales. La elección de un modelo u otro dependerá del objetivo luminotécnico a conseguir.

Aunque pudiera pensarse que la orientación de la superficie acristalada ejercería una gran influencia sobre las condiciones de iluminación natural y de insolación, los resultados muestran que su impacto es más bien moderado sobre los indicadores sobre los que se ha definido un requisito. Su mayor impacto se produce en el indicador de *insolación excesiva*, con relativamente grandes variaciones según la orientación, y las menores se encuentran en la contribución difusa de la iluminación natural, tal como era de esperar, y en el mantenimiento a lo largo del año de las condiciones mínimas de iluminación.

La distribución del hueco y la forma son otros dos parámetros que puede decirse que matizan las condiciones de iluminación natural y de insolación. Su impacto en casi todos los indicadores es bastante bajo. En el caso de la distribución del hueco, se ha visto que generalmente aumenta las condiciones iniciales, pero en el caso de la forma, ésta reduce las condiciones iniciales, especialmente si parte de la superficie acristalada se encuentra por debajo del plano de trabajo.

Aunque el voladizo presenta un comportamiento similar a las lamas fijas horizontales, su efecto es bastante más suave, por lo que su impacto sobre los diferentes indicadores también es más reducido. Por lo tanto, si bien sirve como una medida reductora, debería aplicarse en casos en los

que no se requiera una gran reducción de las condiciones de iluminación natural pero sí de la *insolación excesiva*.

Por último, dentro del contexto de esta investigación, se encontrarían las lamas verticales. Sobre este parámetro se ha de señalar que en el análisis comparativo se aplicó sobre un modelo de referencia orientado al sur, por lo que su efectividad, debido a la trayectoria solar, es mínima. Por tanto es necesario su estudio sobre otras orientaciones para obtener unos resultados más concluyentes y generalizados. Este estudio por orientaciones debería extenderse, además, a los parámetros cuyo efecto depende de la trayectoria solar como son los elementos de protección solar y la obstrucción del entorno.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros de estudio ordenados según su impacto sobre la obtención simultánea de diferentes rangos de iluminancia en el plano de trabajo.

sUDI 100	sUDI 100-300	sUDI 300-500	sUDI 500-3000	sUDI 3000
Retícula	Obstrucción	Orientación	Posición	Tamaño
L. Verticales	Retícula	Retícula	Retícula	Obstrucción
Obstrucción	Posición	Voladizo	Tamaño	Localización
Transparencia	Transparencia	L. Horizontales	L. Horizontales	L. Verticales
L. Horizontales	L. Verticales	Tamaño	L. Verticales	Retícula
Tamaño	L. Horizontales	Transparencia	Transparencia	Posición
Localización	Tamaño	Obstrucción	Obstrucción	L. Horizontales
Posición	División	Posición	División	Orientación
Orientación	Localización	División	Localización	Transparencia
Forma	Orientación	L. Verticales	Voladizo	Voladizo
División	Forma	Distribución	Orientación	Distribución
Distribución	Voladizo	Forma	Forma	División
Voladizo	Distribución	Localización	Distribución	Forma
Saliente	Saliente	Saliente	Saliente	Saliente

Tabla 110: Orden de influencia de cada parámetro sobre los rangos de iluminancia

Los objetivos luminotécnicos marcan que para unas adecuadas condiciones de iluminación natural se debe maximizar la cobertura del plano de trabajo con iluminancias adecuadas para el desarrollo de tareas visuales de baja, media o alta precisión, según el destino final del espacio, y minimizar la cobertura del plano de trabajo con iluminancia excesiva, o con muy baja iluminancia, para evitar situaciones de deslumbramiento y el uso de iluminación artificial de forma continua respectivamente.

En el análisis por indicadores se observó que los rangos extremos de iluminancias son muy difícilmente modificables por casi todos los parámetros, por lo que podría decirse que caracterizan el potencial de iluminación del espacio de estudio. También se observó que el rango adecuado para las tareas de media precisión tampoco presentaba muchas variaciones, siendo relativamente constante en todas las modificaciones realizadas al modelo de referencia.

Sin embargo, el rango que mayor variación sufría era el correspondiente a las iluminancias adecuadas para el desarrollo de tareas visuales de alta precisión. Además, se pudo apreciar que las reducciones sufridas en este rango suelen redundar en un aumento del rango de iluminancias adecuadas para el desarrollo de tareas visuales de baja precisión.

En un principio pudiera pensarse que esta mayor variación pudiera deberse al potencial de iluminación natural que proporciona la localización de referencia, pero los resultados muestran que este parámetro ejerce una relativamente baja influencia en estos rangos. Sin embargo, sí ejerce una mayor influencia en el rango de la iluminación excesiva.

En principio, este orden de parámetros debería tenerse en cuenta en combinación con la tabla anterior para, alcanzados unos requisitos mínimos de iluminación y máximos de insolación, enfocar la atención hacia aquellos rangos de iluminancia que se quieren priorizar según las actividades que se van a desarrollar en los diferentes espacios. De esta forma, no son los mismos parámetros los que serán prioritarios para diseñar el salón o el dormitorio de una vivienda que para diseñar un espacio de oficinas.

También se observa que el orden de los parámetros para el rango de 500 a 3000 lux es muy similar al obtenido para el rango 300 a 3000 lux, con mayor divergencia respecto al indicador *DSg*. La diferencia reside en el que este último también considera la iluminación excesiva, por lo que para proporcionar unas condiciones de iluminación natural más adecuadas, deberíamos centrarnos sólo en el rango útil.

Así como se establece un orden de prioridad de los parámetros de estudio, también se pueden priorizar algunos de los indicadores de iluminación natural como más representativos, para ser considerados en primera instancia, para luego afinar las condiciones de iluminación natural y de insolación mediante la información que proporcionan los demás indicadores.

En este sentido, para dar respuesta relativa a la cobertura del plano de trabajo, se debe atender en primer lugar al indicador *Iluminación Natural Útil simultánea* entre 300 y 3000 lux, al contemplar los valores límites que establece la comunidad internacional y afinarse a posteriori mediante los rangos específicos según la tarea visual. En cuanto al mantenimiento de las condiciones de iluminación en el espacio, el indicador a tener en cuenta es la *Suficiente Iluminación Natural mantenida*. Por último, para atender a la insolación del espacio se debe considerar el indicador *Insolación Excesiva*, que se correlaciona con la iluminación excesiva.

Si bien la desviación estándar puede ofrecer información sobre el impacto o la dispersión de los valores de cada parámetro según cada indicador dando lugar a una cierta ordenación de los parámetros, no es posible distinguir si esta dispersión de los valores se realiza en positivo o en negativo, aumentando o disminuyendo de forma global las condiciones de iluminación natural y de insolación.

Es por ello que se muestra a continuación, para los tres principales indicadores, los incrementos máximo y mínimo que produce cada uno de los parámetros respecto a sus valores límite. Se señalan en rojo los valores que coinciden con las condiciones de referencia y en gris los valores que no alcanzan el requisito mínimo o se exceden del requisito máximo

	sUDI <sub>300-3000</sub> mx	DSm mx	SHGe mx	sUDI <sub>300-3000</sub> mn	DSm mn	SHGe mn
Localización	31.81%	25.81%	14.68%	2.92%	1.38%	-11.49%
Obstrucción	30.38%	23.48%	13.43%	-21.70%	-41.37%	-28.81%
Orientación	35.73%	24.01%	13.43%	25.98%	17.16%	-37.18%
Tamaño	30.38%	38.51%	48.47%	-49.41%	-8.79%	-9.49%
Transparencia	30.38%	23.48%	13.43%	-23.96%	-29.27%	-36.52%
Posición	35.97%	23.48%	13.43%	-42.51%	-39.05%	12.62%
Forma	31.34%	24.57%	13.53%	28.00%	14.77%	12.83%
División	31.68%	24.03%	13.68%	10.76%	8.47%	13.19%
Distribución	35.97%	30.87%	24.34%	30.38%	23.48%	5.78%
Voladizo	30.38%	23.48%	13.43%	28.95%	13.83%	-12.41%
Saliente	30.85%	23.48%	13.43%	29.67%	20.21%	8.32%
L. horizontales	30.38%	23.48%	13.43%	-20.40%	-11.54%	-13.73%
L. verticales	30.38%	23.48%	13.43%	-15.40%	-11.35%	-6.03%
Retícula	30.38%	23.48%	13.43%	-50.00%	-49.06%	-28.32%

Tabla 111: Incrementos máximo y mínimo respecto a requisito



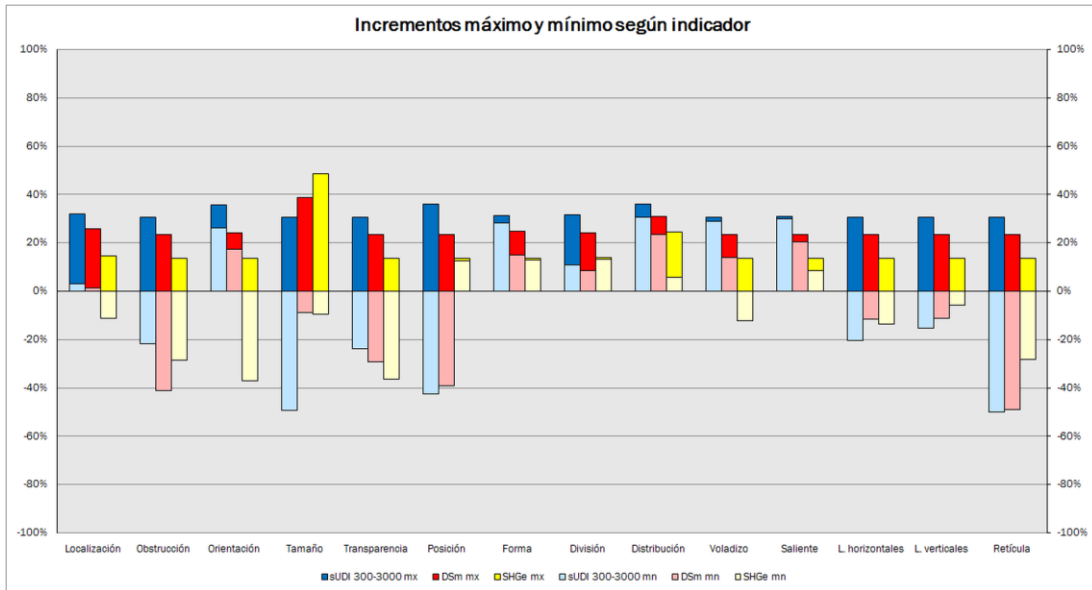


Figura 386: Incrementos máximo y mínimo según indicador.

Se observa que la mitad de los parámetros pueden reducir por debajo del requisito mínimo el rango de iluminancias entre 300 y 3000 lux, así como el mantenimiento de las condiciones de iluminación natural en el espacio. Sin embargo ya se ha visto anteriormente que estas reducciones excesivas se producen en determinados modelos extremos de cada uno de los parámetros de estudio.

También puede apreciarse que sólo cinco de los catorce parámetros no son capaces de reducir la *insolación excesiva* a valores menores del 40% de las horas diurnas anuales. También es cierto que se consigue reducir hasta nivel aceptable este indicador en los modelos más extremos de los parámetros de estudio, por lo que hay que equilibrar la compatibilidad entre reducir la insolación con alcanzar una cobertura mínima del plano de trabajo y un mantenimiento mínimo en el tiempo.

Como resultado de la diferencia de los incrementos se obtiene finalmente el incremento neto de cada uno de los parámetros, que se muestra en la siguiente figura. Con estos valores se aprecia el impacto global de cada uno de los parámetros sobre las condiciones de iluminación natural e insolación.

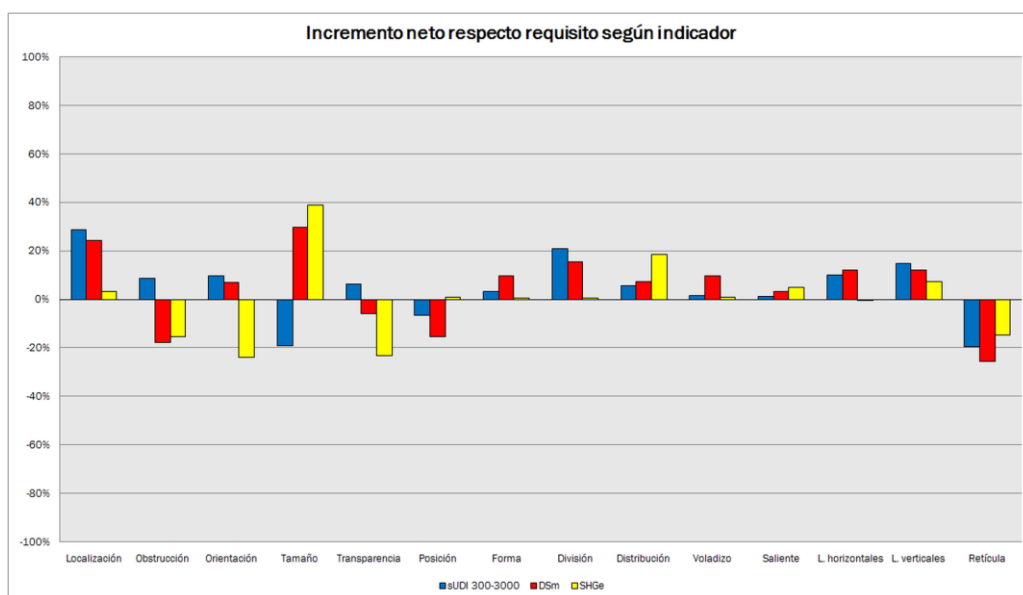


Figura 387: Incremento neto de cada parámetro según indicador

En la tabla se señalan en rojo los incrementos netos negativos, es decir, aquellos parámetros en los que el valor mínimo es un detrimento mayor que el incremento máximo. Estos parámetros requieren de una especial atención por la alta desviación estándar que presentan capaces de dar un balance global negativo. En morado se señalan aquellos parámetros en los que el valor mínimo es un detrimento menor que el incremento máximo, por lo que el valor neto resulta positivo. En este caso cuanto más cercano del cero sea el incremento neto, mayor es el impacto de este parámetro. Estos parámetros presentan una desviación estándar moderada.

	sUDI <sub>300-3000</sub>	DSm	SHGe
Localización	28.90%	24.43%	3.20%
Obstrucción	8.68%	-17.89%	-15.38%
Orientación	9.75%	6.85%	-23.75%
Tamaño	-19.03%	29.72%	38.98%
Transparencia	6.42%	-5.79%	-23.09%
Posición	-6.54%	-15.57%	0.81%
Forma	3.34%	9.80%	0.70%
División	20.92%	15.57%	0.49%
Distribución	5.59%	7.39%	18.56%
Voladizo	1.43%	9.65%	1.02%
Saliente	1.18%	3.27%	5.10%
L. horizontales	9.98%	11.94%	-0.31%
L. verticales	14.98%	12.13%	7.40%
Retícula	-19.62%	-25.58%	-14.89%

Tabla 112: Incremento neto según indicador

En negro se mantienen aquellos parámetros en los que el valor mínimo es un incremento de valor reducido respecto al valor límite. Es decir, que todos los valores se encuentran por encima del valor límite pero por pocos puntos. Estos casos presentan una baja desviación estándar. Por último se señalan en gris aquellos parámetros cuyos incrementos mínimos son incrementos respecto al valor límite con poca diferencia del incremento máximo. Es decir, son parámetros con una muy baja desviación estándar, con una baja influencia sobre las condiciones de iluminación natural e insolación.

En función de estos datos requieren de especial atención para una adecuada cobertura y mantenimiento de las condiciones de iluminación natural:

- Cobertura: Retícula de lamas, tamaño del hueco y posición del hueco
- Mantenimiento: Retícula de lamas, obstrucción del entorno, posición del hueco y transparencia del vidrio

Requiriendo de una atención moderada:

- Cobertura: Transparencia del vidrio, obstrucción del entorno, las lamas fijas horizontales y las verticales
- Mantenimiento: Las lamas fijas horizontales, las verticales y el tamaño del hueco

La división y la localización componen el tercer grupo para la cobertura y el mantenimiento. La orientación, la forma del hueco la distribución, el voladizo y el saliente lateral proporcionan un bajo impacto sobre estos indicadores, por lo que permiten una mayor libertad a la hora de ser modificados.

En el caso de la insolación excesiva, al definirse un límite máximo requieren de mayor atención los parámetros en los que aunque se producen detrimentos, éstos no superan los incrementos como son el tamaño del hueco, las lamas verticales, la localización y el voladizo.

Con una atención moderada, para no desequilibrar las condiciones de iluminación natural se deben considerar la orientación, la transparencia del vidrio, la obstrucción del entorno, la retícula de lamas fijas y las lamas fijas horizontales.

La distribución del hueco, aunque produce un cierto impacto sobre este indicador, proporciona un impacto global positivo, por lo que sus modelos no llegan a reducir sus valores por debajo del mínimo.

Los demás parámetros, como la posición del hueco, la forma, la división y el saliente lateral, tienen un muy bajo impacto sobre este indicador, por lo que matizarán las condiciones de insolación del espacio.



## 4.7 Aplicación al diseño arquitectónico

Una vez analizados por separado cada uno de los parámetros de estudio y en conjunto mediante el análisis de los indicadores, en este apartado se procede a aplicar los resultados obtenidos al diseño arquitectónico, fin último de esta investigación.

Por un lado, a la vista de los resultados se obtiene que para proporcionar iluminancias adecuadas para la mayoría de las tareas visuales en el plano de trabajo, los parámetros que requieren de mayor atención son la retícula de lamas, el tamaño del hueco y la posición del mismo en el paramento.

Sin embargo tanto el caso de la retícula de lamas fijas como la posición del hueco se trata de dos parámetros en los que son determinados modelos de cada serie los que provocan la mayor desviación estándar y, por tanto, impacto sobre este indicador. Por lo que sobre estos parámetros se establecen precauciones a tener en cuenta.

Dicho esto se puede afirmar que el tamaño del hueco es un parámetro que condiciona el potencial de iluminación natural del espacio, de forma que un defecto del mismo provoca grandes reducciones y un exceso conlleva una iluminación excesiva. Su alta variabilidad lleva a considerarlo como el primer elemento que debe definirse cuidadosamente en el proyecto arquitectónico.

No obstante para determinar el tamaño de hueco más adecuado para conseguir los objetivos luminotécnicos, es necesario considerar, en primer lugar, aquellos parámetros que son inherentes al proyecto, y que tienen menor grado de libertad, como son las condiciones climáticas de la localización, la orientación y la obstrucción del entorno según cada orientación.

Para una mejor visualización del procedimiento de aplicación se pone como ejemplo el caso hipotético el diseño de los huecos de un nuevo edificio. Para ello, supongamos el nuevo edificio residencial diseñado por el Atelier Du Pont ubicado en la Rue de Nantes en París [372] y obviemos la definición final de las ventanas.

Este edificio residencial, con forma de L, alberga 20 viviendas sociales, distribuidas entre el cuerpo que forma la fachada principal del edificio y el cuerpo aterrazado que da al jardín interior. El proyecto se inserta en una estrecha parcela rodeada de edificios residenciales medianeros. En este contexto el proyecto cuenta con fachadas acristaladas en tres orientaciones: la fachada principal, hacia la Rue de Nantes, con orientación Nordeste (40°), la fachada del jardín y las viviendas aterrazadas, con orientación Suroeste (220°), y la fachada hacia la medianera, con orientación Noroeste (310°) [Figura 388].

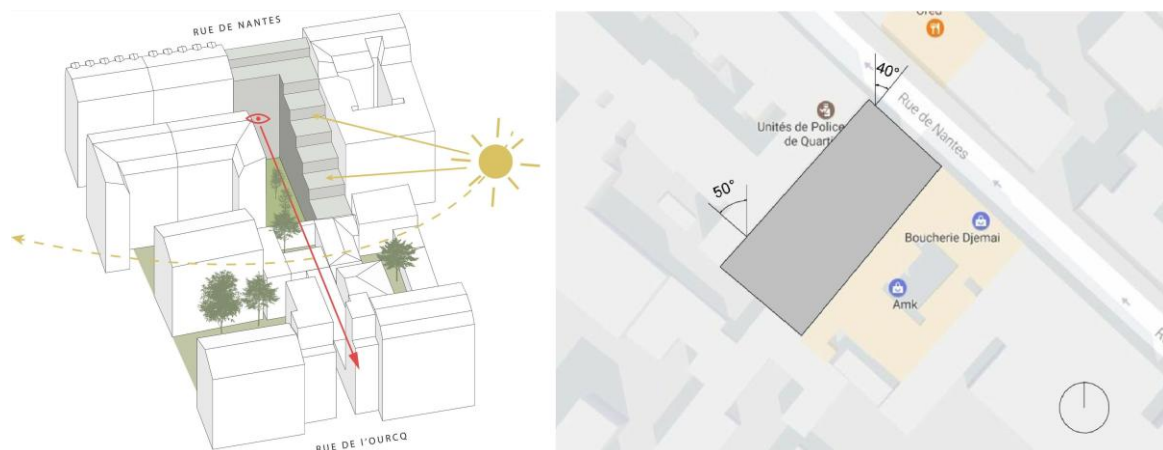


Figura 388: Esquema y situación del edificio residencial 'Gradins-jardins' del Atelier du pont [372]

Para aplicar los resultados de esta investigación, en primer lugar se aplicarían los factores de proporcionalidad correspondientes a la localización [Tabla 61] y la orientación de cada una de las fachadas [Tabla 67] sobre el modelo de referencia:

	<i>sUDI</i> /med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	<i>SHGe</i>
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
OO_ref	0.00%	2.14%	9.51%	58.50%	6.06%	54.93%	97.38%	73.48%	53.43%
París_factor	---	2.78	0.99	0.65	0.06	0.90	0.75	0.79	0.65
París (48'73°)	---	5.95%	9.39%	38.05%	0.36%	49.35%	73.13%	58.23%	34.76%
NE_factor	---	2.39	2.94	0.63	0.00	1.00	0.94	0.96	0.34
Nordeste	---	14.22%	27.60%	23.97%	0.0%	49.35%	68.74%	55.90%	11.82%
SO_factor	---	1.22	0.86	0.94	0.49	1.00	0.99	1.01	0.87
Suroeste	---	7.26%	8.07%	35.77%	0.18%	49.35%	72.40%	58.81%	30.24%
ON_factor	---	2.39	3.03	0.64	0.00	1.00	0.90	0.95	0.33
Noroeste	---	14.22%	28.45%	24.35%	0.0%	49.35%	65.82%	55.32%	11.47%

Tabla 113: Aplicación de los factores de proporcionalidad de la Localización y la Orientación

Se observa que la aplicación del factor de proporcionalidad de la localización modifica los valores medianos anuales de cada uno de los indicadores proporcionando un panorama inicial diferente del que se obtenía en el modelo de referencia. Cabe señalar que, debido a que el modelo de referencia presenta un valor nulo para el indicador de la obtención simultánea de iluminancias menores de 100 lux, no se pueden obtener valores en este rango de iluminancias, ya que se produce una indeterminación matemática.

Al realizar la simulación del modelo de referencia aplicándole la modificación de la localización y la orientación se obtienen los siguientes resultados:

	<i>sUDI</i> /med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	<i>SHGe</i>
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
París (48'73°)	0.36%	5.95%	9.39%	38.05%	0.36%	49.35%	73.13%	58.23%	34.76%
Nordeste	4.00%	28.00%	17.33%	14.67%	0.00%	34.36%	32.44%	37.78%	12.30%
Suroeste	2.22%	13.33%	13.33%	21.78%	0.00%	34.01%	45.33%	47.87%	31.39%
Noroeste	4.00%	31.11%	17.33%	14.67%	0.00%	34.60%	32.44%	38.04%	13.07%

Tabla 114: Simulación de la incorporación de la Localización y la Orientación

Se observa cómo se producen diferencias cuantitativas entre el modelo calculado mediante factores de proporcionalidad y el modelo simulado con las modificaciones en los parámetros Localización y Orientación, sin embargo se mantiene cierta similitud en el comportamiento relativo de los valores, especialmente en el indicador *SHGe*.

Además cabe señalar que como el modelo de referencia tiene un valor de 0.00% en el indicador *sUDI*<sub><100</sub> no es posible determinar el factor de proporcionalidad, pero mediante la simulación es posible obtener valores en todos los indicadores.

Por otro lado, es importante señalar que mediante la simulación, que es un escenario más próximo a las condiciones reales, se obtiene que en todas las orientaciones habría que aumentar el potencial de iluminación natural ya que en ningún caso se alcanza el requisito mínimo de 50% de cobertura del plano de trabajo ni 50% de las horas diurnas anuales, aunque no se supera el valor máximo de 40% de las horas diurnas anuales con una insolación excesiva, lo cual se refleja en que

en ningún caso, con una superficie del 10% y sin obstrucciones del entorno, se tienen situaciones de deslumbramiento.

A la vista de estos resultados se concluye que no es posible aplicar directamente los factores de proporcionalidad ya que el valor absoluto de cada uno de los indicadores para cada una de las orientaciones varía con la localización del proyecto, aunque la evolución de éstos sea similar al que se produce con el modelo de referencia.

Si bien se han modificado las condiciones climáticas y la orientación del modelo de referencia, para conocer el potencial de iluminación natural y de insolación del espacio es necesario tener en cuenta las obstrucciones del entorno. Visto que tras la aplicación de los factores de proporcionalidad de localización y orientación los resultados divergen de los resultados obtenidos mediante simulación, se toman los escenarios simulados como puntos de partida para la aplicación de los factores de proporcionalidad relativos a las obstrucciones frontales de cada fachada.

El edificio, de siete plantas, cuya fachada principal mira a la Rue de Nantes, tiene un edificio frente a la fachada de prácticamente la misma altura. En el ámbito interior se distinguen varias situaciones. Por un lado, la fachada del cuerpo principal sólo tiene como obstrucción frontal más inmediata la tapia de una altura que delimita la parcela. Las viviendas aterrazadas tienen como obstrucción frontal edificios que sobresalen una o dos plantas pero se encuentran a cierta distancia, por lo que no representan una gran obstrucción, salvo para la primera terraza, que se encuentra en la planta segunda. Finalmente la fachada Noroeste mira a una medianera de aproximadamente la misma altura del edificio, separada de la fachada mediante el jardín.



Figura 389: Secciones de las fachadas principal, viviendas aterrazadas y fachada hacia medianera

Si analizamos la fachada principal se observa que las dos primeras plantas tienen un ángulo de obstrucción frontal mayor de  $54^\circ$ , las plantas tercera y cuarta tienen un ángulo de obstrucción de aproximadamente  $45^\circ$ , la quinta planta de  $30^\circ$ , la sexta próximo a  $15^\circ$  y la última planta prácticamente no tiene ángulo de obstrucción frontal.

Como en el escenario simulado tenemos la geometría de referencia sin obstáculos, se aplican los factores de proporcionalidad relativos a la obstrucción frontal [Tabla 64] para las plantas baja y primera, que cuentan con la mayor obstrucción, cercana a  $60^\circ$ .

El mismo proceso se aplicaría a la fachada Noroeste, que corresponde a la fachada que mira hacia la medianera.

	sUDI/med/ann					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	DSd	DSg	DSm	SHGe
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
Nordeste	4.00%	28.00%	17.33%	14.67%	0.00%	34.36%	32.44%	37.78%	12.30%
Factor 60°	---	19.89	1.50	0.37	0.18	0.43	0.40	0.40	0.48
NE_60°	----	556.92%	26.00%	5.43%	0.00%	14.77%	12.97%	15.11%	5.90%
NE_60° sim	53.33%	32.44%	6.67%	4.44%	0.00%	1.78%	11.56%	7.44%	1.34%

Tabla 115: Aplicación del factor de proporcionalidad relativo a la obstrucción frontal sobre la fachada Noreste y simulación de las mismas condiciones

Como se puede observar, al aplicar los factores de proporcionalidad se obtienen resultados fuera de órbita como una cobertura mayor del 100% como valor mediano anual. Sin embargo, mediante la simulación de las mismas condiciones se obtienen resultados para todos los indicadores dentro de un rango normal. Una vez más se demuestra que no es posible la aplicación directa de los factores de proporcionalidad.

De los resultados se obtiene que en todas las plantas del edificio se debe incrementar la superficie de hueco, medida que aumenta la captación de radiación solar, para poder alcanzar los requisitos mínimos de iluminación natural suficiente y que el rango de iluminancias con mayor cobertura sea, al menos, el adecuado para el desarrollo de tareas visuales de baja precisión, ya que se trata de un espacio residencial, o de media precisión, para aquellas estancias donde se requiera de una mayor iluminación natural como un despacho o la cocina.

Siguiendo las recomendaciones provenientes del estado del arte, para una fachada con gran componente difusa, la superficie del hueco debería rondar el 40% de la superficie de fachada. Esta recomendación de diseño está en línea con los resultados observados de simulación y la propuesta emitida para mejorar el potencial de iluminación natural de este espacio.

Tomando esta recomendación, se simula el último escenario incorporando esta modificación en la superficie de hueco. También se simula para el escenario sin obstrucción frontal con una superficie mayor a la del modelo de referencia, para determinar si serían necesarias otras posibles acciones reductoras. Por la similitud en el comportamiento de las fachadas Nordeste y Noroeste se podrán aplicar las recomendaciones a ambas fachadas.



Figura 390: Vista de la fachada principal y la fachada interior hacia la medianera



	<i>sUDI/med/ann</i>					Daylight Sufficiency			Solar Gains
	<100	100-300	300-500	500-3000	>3000	<i>DSd</i>	<i>DSg</i>	<i>DSm</i>	<i>SHGe</i>
	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% wp	% h	% h
NE_00°_10%	4.00%	28.00%	17.33%	14.67%	0.00%	34.36%	32.44%	37.78%	12.30%
NE_00°_20%	0.44%	4.44%	10.22%	40.00%	0.00%	18.31%	86.67%	62.03%	45.63%
NE_60°_40%	0.00%	1.33%	8.00%	43.56%	0.00%	14.98%	78.22%	58.68%	43.45%

Tabla 116: Simulación de una superficie mayor sobre los extremos del rango de obstrucción frontal

Tal como se puede observar en los resultados, al aumentar la superficie de hueco en las plantas inferiores hasta un 40% y en la última planta al 20% se alcanzan los requisitos mínimos de suficiencia de iluminación natural global, no siendo así si sólo se tuviera en cuenta la contribución difusa de la luz natural. Por otro lado, aunque se supera el límite de 40% horas diurnas anuales de insolación excesiva, se aprecia que no se aumenta el valor mediano anual de situaciones donde es probable la aparición de deslumbramiento, luego este límite máximo puede que sólo sea de aplicación a la localización del modelo de referencia, es decir, a Sevilla.

También se observa que al aumentar la superficie de hueco, el rango de iluminancias con mayor cobertura es el comprendido entre 500 y 3000 lux, por lo que, considerando el valor de *DSg* y la distribución de cobertura del plano de trabajo en los diferentes rangos de iluminancias podría plantearse reducir la superficie de hueco hasta un 30% en las plantas inferiores y al 15% en las últimas plantas o bien aplicar medidas correctoras como la transparencia del vidrio, para proteger la privacidad de las viviendas, o elementos de protección solar sobre la superficie del hueco, como un sistema de lamas.

Tal como se ha podido observar mediante este ejemplo, no es posible la aplicación directa de los factores de proporcionalidad obtenidos en el análisis de resultados de las series ya que aunque parece que se mantienen los comportamientos relativos de los parámetros, los valores no corresponden a los que se obtienen mediante simulación, escenario más próximo a la realidad.

Sin embargo, con la metodología propuesta en esta tesis es muy sencillo, con un primer boceto del nuevo edificio, realizar la simulación de un modelo sencillo con las características de la localización, la orientación y las obstrucciones del emplazamiento para proporcionar una guía a la hora de definir ciertos parámetros que son determinantes del potencial de iluminación natural y de insolación como el tamaño del hueco.

Además, con esta primera aproximación se tiene información sobre la distribución de las iluminancias en los diferentes rangos, por lo que se puede comenzar a pensar desde el proyecto de diferentes estrategias arquitectónicas que permitan adecuar las iluminancias a las tareas visuales que se van a desarrollar en estos espacios.

Por otro lado, atendiendo a los resultados obtenidos en esta investigación, se pueden enunciar ciertas recomendaciones para el caso de aquellos espacios localizados en Sevilla con su fachada acristalada orientación Sur.

En primer lugar, respecto al tamaño del hueco, no se obtiene una mayor suficiencia de iluminación natural aumentando la superficie de la ventana a partir del 20% de la superficie de suelo, pero sí aumenta el porcentaje de horas diurnas anuales en que se recibe una insolación excesiva.

En cualquier caso, a partir de una superficie de hueco del 10% de la superficie de suelo aparecen zonas con una iluminancia excesiva especialmente durante los meses de invierno, por lo que será necesario incorporar algún tipo de protección solar si se quiere eliminar esta probabilidad

de deslumbramiento, que por otro lado puede ser beneficioso en invierno por la carga térmica asociada.

La presencia de obstrucciones frontales, la reducción de la transparencia del vidrio y la incorporación de protecciones solares producen efectos reductores tanto de las condiciones de iluminación como de la insolación recibida. Cuando el ángulo de obstrucción frontal es mayor de  $45^\circ$  se reducen tanto ambas condiciones que es necesario aumentar la superficie del hueco. Este comportamiento es similar a unas lamas horizontales con un ángulo de  $60^\circ$ , al de una retícula con un ángulo de  $45^\circ$  o a la incorporación de un vidrio con una transparencia menor del 50%.

En cualquier caso, cuando se plantee la incorporación de una medida reductora, además de obtener las condiciones de iluminación e insolación del espacio, es necesario evaluar su impacto en el balance térmico del mismo para evitar estrategias que sólo mejore un aspecto de la exposición a la radiación solar.

En otro orden de valores se encuentran otras estrategias más estéticas o subjetivas como son la posición del hueco, su forma, la división y la distribución de la superficie acristalada en diversos paramentos. Todas estas estrategias matizan las condiciones de iluminación pero sin provocar grandes impactos salvo en aquellos casos en los que parte de la superficie de la ventana se encuentra por debajo del plano de trabajo, entonces se produce una gran reducción de la iluminación del espacio, útil para el diseño de espacios que se pretenda estén en penumbra.



## 4.8 Abstract of the Analysis of Results

---

Once the simulations had been carried out, the results were analysed and compared with the results of studies conducted in the State-of-the-Art.

The «synthesis-analysis sheet» corresponding to each model (presented in Annex B) summarizes:

1. Periods when the useful illuminance range (300-3000 lux) was attained, extracted by time chart analysis.
2. Time analysis of solar gain through windows, determining statistical values such as maximum, mean and median values and standard deviation.
3. Qualitative analysis of how values are distributed over the workplane based on *Daylight Factor (DF)*, *sunlight hours* and *Incident Solar Radiation* isolines.
4. Analysis of statistical values for the distribution of *Daylight Factor*, *sunlight hours* and *Incident Solar Radiation* on the workplane.
5. *Global* and *Maintained Daylight Sufficiency (DSg y DSm)* values attained in the space. Quantification of the need to use artificial light.
6. Analysis of monthly evolution of the newly-generated metrics:
  - a. General trends of the different curves and interrelationships between different metrics
  - b. Global contribution vs diffuse contribution and their relationship with *Excessive Solar Heat Gain (SHGe)*
  - c. Analysis of values attained for each illuminance range proposed in the *Simultaneous Useful Daylight Illuminance (sUDI)* scheme.

The main body of this chapter firstly presents a more extensive analysis of the reference model as an individual element, following the same scheme as that adopted in the «synthesis-analysis sheets». In each series, the reference model constitutes one of the study parameter variations, so the analysis of the results from the different series or parameters studied is thus contextualized.

Individual results from each studied series corresponding to a study parameter are then analysed, comparing the annual median results obtained for each of the models in the series. This analysis includes:

- a global overview of the annual median values of all the metrics.
- analysis of Simultaneous Useful Daylight Illuminance metrics.
- determination of proportionality factors with regard to the reference model
- analysis of the monthly evolution of given models for the most important metrics

## 4.8 Resumen del Análisis de Resultados

Tras realizar las simulaciones se han analizado los resultados y contrastado con los resultados de los estudios revisados en el Estado del Arte.

En cada «ficha de síntesis-análisis» de cada modelo, recogidas en el Anexo B, se analiza de forma resumida:

1. Periodos de obtención del rango útil de iluminancias (300-3000 lux), a través del análisis del mapa temporal.
2. Análisis temporal de las ganancias solares a través de las ventanas, con la determinación de algunos valores estadísticos, como el valor máximo, la media, la mediana y la desviación estándar.
3. Análisis cualitativo de la distribución de valores en el plano a partir de las iso-líneas de *Factor de Iluminación Natural (DF)*, *Horas de Soleamiento* y *Radiación Solar Incidente* en el plano de trabajo
4. Análisis de los valores estadísticos de la distribución del *Factor de Iluminación Natural*, las *Horas de Soleamiento* y la *Radiación Solar Incidente* en el plano de trabajo.
5. Valores alcanzados de *Suficiencia de Iluminación Natural global y mantenida (DSg y DSm)* en el espacio. Cuantificación de la necesidad de utilización de iluminación artificial.
6. Análisis de la evolución mensual de los indicadores desarrollados:
  - a. Tendencias generales de las diferentes curvas e interrelación entre diferentes indicadores
  - b. Contribución global vs contribución difusa y su relación con la *Insolación excesiva (SHGe)*
  - c. Análisis de los valores alcanzados para cada rango de iluminancia propuesto en el esquema de *Iluminancia Natural Útil simultánea (sUDI)*

En el cuerpo de este capítulo se ha analizado de forma más extensa, en primer lugar, el modelo de referencia como elemento individual siguiendo el mismo esquema que el abordado en las «fichas de síntesis-análisis». Esta operación pone en contexto el análisis de resultados de las diferentes series o parámetros estudiados, ya que en cada serie el modelo de referencia constituye una de las variaciones del parámetro de estudio.

A continuación se realiza el análisis de individualizado de cada una de las series de estudio, que corresponden a un parámetro de estudio. Este análisis compara los resultados medianos anuales obtenidos para cada uno de los modelos de la serie. El análisis comprende:

- la visión global de los valores medianos anuales de todos los indicadores
- el análisis de los indicadores de Iluminancia Natural Útil simultánea
- la obtención de los factores de proporcionalidad respecto al modelo de referencia
- el análisis de la evolución mensual de determinados modelos para los indicadores más relevantes

Once each series had been analysed, the performance of each metric in the series was analysed to produce a global analysis of all the parameters. Statistical values were thus obtained for each metric in every series, and these were compared with the lighting and insolation requirements for the space, making it possible to assess which parameters have a greater impact on daylighting and insolation levels and whether each parameter helps improve or worsen those levels.

This metric-by-metric evaluation is used to perform a global analysis of the whole set of study parameters and metrics and obtain a global evaluation of each study parameter based on specific lighting and insolation requirements.

Finally, and in line with our starting hypothesis that proportionality factors can be used in a simple model to predetermine daylighting and insolation levels in the early design phases of a building, the results obtained were applied to a new building design.

There have been compared the results obtained by means of the application of the factors and by means of the application of the methodology of calculation developed in this research and there has been verified that the new methodology contributes with results that describe better the conditions of daylighting and insolation of a complex reality, where there is combined the effect of different architectural strategies.

There has been detected the great dependence of the solar path of some of the studied strategies, as well as of the climatology, reality that does of the calculation of the first sketches of design a necessary step to orientate on the architectural strategies to continue to obtain a few adecudas conditions of daylighting and insolation of the project.

Una vez realizado el análisis de cada serie, se ha realizado el análisis global de todos los parámetros mediante el análisis del comportamiento de cada uno de los indicadores. En este análisis se han obtenido los valores estadísticos para cada indicador de todas las series y se ha comparado con el requisito luminotécnico y de insolación del espacio. De esta forma se ha obtenido una valoración sobre cuáles son los parámetros que tienen un mayor impacto sobre las condiciones de iluminación natural e insolación y si cada parámetro contribuye a la mejora o al empeoramiento de las mismas.

Con esta valoración según cada indicador se realiza el análisis global del conjunto de parámetros de estudio e indicadores, de forma que, según el requisito luminotécnico y de insolación se expone la valoración global de cada uno de los parámetros de estudio.

Por último, siguiendo la hipótesis inicial de que con los factores de proporcionalidad se pueden predeterminar, a partir de un modelo sencillo, las condiciones de iluminación natural y de insolación siendo de utilidad en las primeras fases de diseño de un edificio, se han aplicado los resultados sobre un edificio de reciente construcción.

Se han comparado los resultados obtenidos mediante la aplicación de los factores y mediante la aplicación de la metodología de cálculo desarrollada en esta investigación y se ha comprobado que la nueva metodología aporta unos resultados que describen mejor las condiciones de iluminación natural y de insolación de una realidad compleja, donde se combina el efecto de diferentes estrategias arquitectónicas.

Se ha detectado la gran dependencia de la trayectoria solar de algunas de las estrategias estudiadas, así como de la climatología, realidad que hace del cálculo de los primeros bocetos de diseño un paso necesario para orientar sobre las estrategias arquitectónicas a seguir para obtener unas adecuadas condiciones de iluminación natural y de insolación del proyecto.





# CONCLUSIONES 5

## 5. Conclusions

Over the last few years, professionals involved in architectural design have found themselves forced to address annual dynamic thermal performance in their design processes. At the same time, it is becoming increasingly imperative to analyse daylight conditions, focussing on hourly and daily variations reflected in the variability values extracted from climate records.

This urgency is rooted in the desire to fully exploit natural light entering spaces as a means of reducing energy consumption through artificial lighting, even though there currently exist electric lighting technologies with very low power consumption. However, those professionals who specialize only in lighting often neglect the thermal aspects of natural light, thereby producing spaces that are efficiently daylighted but with excessive heat loads due to solar gain through their openings.

Other design approaches based on golden rules rooted in diffuse illuminance can lead to spaces with excessive lighting, above all in sunny climates, where it is common to find architectural spaces with excellent daylighting potential which is, however, neutralized because users have used whatever type of shading device is available to block light from entering and avoid glare.

Architectural design – the decisions taken and the solutions adopted during the design process – is decisive in determining daylighting and insolation in a building's interior spaces. Design affects not only the quantity but also by the quality of the interior ambient lighting, not to mention its impact on the thermal environment, so essentially a design project defines how an interior will be perceived by its users and its requirements in terms of heating and artificial lighting systems.

Furthermore, solar radiation has biological effects on human beings. Daylight allows us to see the world around us, but it is also important for our health, since it controls our biological clock. In fact, daylight regulates the circadian rhythms of all biological systems, triggering daily and seasonal reactions in plants, allowing visual perception and thus facilitating biocommunication between different species. Daylight is the link between our wellbeing and our natural surroundings.

Any consideration of solar radiation in our built environment should therefore not only take into account ambient aspects like the provision of sufficient daylight or its thermal influence, but also strive to attain biologically acceptable spaces.

With this in mind, this study analyses how each of the elements involved in daylighting (also known as daylighting strategies) influences interior spaces, expressing this influence in terms of annual variations in certain *Dynamic Daylight Metric* values obtained on the workplane and annual variations in values obtained for solar gain through openings. Each element is thus characterized by the influence it exerts on daylight conditions during the course of the year, while at the same time providing information about its contribution to the interior thermal environment.

The objective is to provide more information and raise awareness about how each decision taken during the architectural design process affects the interior environment, and this is done by parametrically analysing each of the elements involved.

## 5. Conclusiones

Durante los últimos años, los profesionales involucrados en el proyecto arquitectónico se han visto forzados a renovarse para incorporar en el proceso de diseño el análisis de las condiciones térmicas en base a su comportamiento dinámico anual. Del mismo modo, es cada vez más apremiante el análisis de las condiciones de iluminación natural en base a su variación horaria y diaria como resultado de la variabilidad recogida en los archivos climáticos.

Esta «urgencia» se fundamenta en tratar de obtener la máxima explotación de la entrada de luz natural en los espacios para reducir el consumo energético de la iluminación artificial, aunque actualmente ya existan tecnologías de iluminación eléctrica de muy bajo consumo energético. Sin embargo, aquellos profesionales que sólo se especializan en iluminación a menudo descuidan el aspecto térmico de la luz natural provocando de este modo espacios iluminados naturalmente pero con una excesiva carga térmica por ganancias solares a través de sus huecos.

Otras prácticas profesionales basadas en reglas de oro fundamentadas en la iluminancia difusa, pueden dar lugar a espacios excesivamente iluminados, especialmente en climas soleados, por lo que lo más habitual será encontrarnos con espacios arquitectónicos con un gran potencial de iluminación natural pero que ha sido anulado porque los usuarios han bloqueado la entrada de luz mediante cualquier tipo de dispositivo para evitar situaciones de deslumbramiento.

El proyecto arquitectónico, las soluciones y decisiones tomadas durante el proceso de diseño, determinan las condiciones de iluminación natural y de insolación de los espacios de un edificio. Éstas determinan no sólo la cantidad sino la cualidad del ambiente luminoso interior, sin olvidar su influencia sobre el ambiente térmico, por lo que el proyecto arquitectónico define la percepción del ambiente interior, así como la demanda de los sistemas térmicos y de iluminación artificial.

Además, la radiación solar nos afecta a biológicamente: la iluminación natural no sólo nos permite percibir nuestro entorno, sino que es importante para la salud humana, siendo la reguladora del reloj biológico. De hecho, la luz natural regula los ritmos circadianos de todos los sistemas biológicos desencadenando la respuesta diaria y estacional de las plantas, permitiendo la percepción visual y, con ella, el fomento de la biocomunicación entre las distintas especies. La luz natural vincula nuestro bienestar con nuestro entorno natural.

Por lo que la consideración de la radiación solar en nuestro entorno construido no sólo debe tener en cuenta los aspectos ambientales, como la provisión de suficiente luz o su influencia en el ambiente térmico, sino que también deberá encaminarse hacia unos ambientes biológicamente aceptables.

En este contexto, este trabajo analiza la influencia de cada uno de los elementos involucrados en las condiciones de iluminación natural, también llamados estrategias de iluminación natural, sobre el ambiente interior, expresado mediante la variación anual de los valores obtenidos en el plano de trabajo de ciertos *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural* y mediante la variación anual de los valores obtenidos de ganancias solares a través de los huecos. De esta forma, cada elemento se ve caracterizado por su influencia sobre las condiciones de iluminación natural a lo largo del año al mismo tiempo que aporta información sobre su aportación al ambiente térmico interior.

El objetivo, por tanto, es proporcionar un mayor conocimiento y conciencia sobre la influencia de cada una de las decisiones que se toman durante el proyecto arquitectónico sobre el ambiente interior, realizado mediante un análisis paramétrico de cada uno de los elementos involucrados.

With the same objective in mind, the hypothesis was formulated that, by analysing and applying the relative weight of each parameter to a starting condition, it is possible to predetermine the daylighting and insolation conditions of a complex reality, thus helping to pre-estimate those elements that are most decisive for defining a space's lighting and insolation potential, such as perimeter openings and shading devices.

To meet the main objective of this thesis, the research was organized into three areas of work:

1. The establishment of climate-based metrics describing and integrating the light and heat components of global solar radiation entering through openings.
2. Using the new metrics to determine how the different architectural strategies studied impact daylighting and insolation.
3. Application of the impact factor corresponding to each study parameter or strategy to the reference model, to describe daylighting and insolation in a more complex reality.

The areas of work which required the most time and effort were the first two, in which new metrics were created - requiring the creation, in turn, of a new working methodology different from the one currently used at international level. This new methodology was then used to study different architectural strategies.

## **5.1 New Metrics**

---

Analysis of existing daylight metrics reveals that, although based on the same primary data, their calculation bases vary and it is therefore impossible to compare the results obtained by each one of them.

To solve this problem, each metric was stripped down to its primary data and then reconstructed, using the same calculation terms for all of them with regard to time range, simultaneous workplane coverage and minimum target illuminance.

The same process was followed to describe a space's insolation conditions, leading the conclusion that the primary datum for solar gain, one per hour and per space, cannot be compared with the primary datum for illuminance, one per hour and per point in space, but that these data may be comparable if the workplane is considered as a unit instead of as a summation of points.

The establishment of a set of common calculation bases made it possible to define 5 new metrics -4 to do with daylighting and 1 to do with insolation in a space.

Three of the metrics gauge the extent to which all points on the workplane attain a given illuminance or range of illuminance over half of the time period studied, and the last expresses how long half of the points on the workplane attain a given illuminance. This latter metric is similar to the heat gain metric, which describes how long a maximum irradiance threshold is exceeded.

Con este objetivo se formula la hipótesis de que, mediante el conocimiento y la aplicación del peso relativo de cada uno de los parámetros sobre una condición de partida, es posible predeterminar las condiciones de iluminación natural y de insolación de una realidad compleja, de forma que sirva para el predimensionamiento de los elementos más determinantes del potencial de iluminación natural y de insolación del espacio, como es el hueco y sus protecciones frente a la radiación solar.

La consecución del objetivo principal de esta tesis ha supuesto la organización de la investigación en tres líneas de trabajo:

1. Establecimiento de indicadores en base climática que describan e integren el aspecto lumínico y térmico del efecto de la entrada de la radiación solar global a través de los huecos.
2. Determinación del impacto de las diferentes estrategias arquitectónicas de estudio sobre las condiciones de iluminación natural y de insolación expresado a través de los nuevos indicadores.
3. Aplicación del factor de impacto de cada una de las estrategias o parámetros de estudio sobre el modelo de referencia para describir las condiciones de iluminación natural y de insolación de una realidad más compleja.

Las dos primeras líneas de trabajo son las que mayor tiempo y dedicación han requerido ya sea por la elaboración de nuevos indicadores, que ha resultado en la creación de una nueva metodología de trabajo, diferente a la que actualmente está establecida en el ámbito internacional, o por la aplicación de la nueva metodología para el estudio de las diferentes estrategias arquitectónicas.

## 5.1 Nuevos indicadores

En el análisis de los indicadores existentes de iluminación natural se evidencia que éstos, aunque parten del mismo dato primario, tienen unas bases de cálculo diferentes entre sí, lo cual hace que no sea posible la comparación entre los resultados que se obtienen con cada uno de ellos.

Como resultado, tras desgranar estos indicadores hasta su dato primario se han vuelto a recomponer utilizando para todos ellos los mismos términos de cálculo relativos al rango temporal, la cobertura simultánea del plano de trabajo y la iluminancia mínima a conseguir.

El mismo proceso se ha realizado para describir las condiciones de insolación de un espacio, llegando a la conclusión de que el dato primario de las ganancias solares, uno por hora y espacio, no puede ser comparado con el dato primario de iluminancia, uno por hora y por punto del espacio, pero sí puede ser susceptible de compararse si se considera el plano de trabajo como una unidad, en vez de una suma de puntos.

El resultado del establecimiento de unas bases de cálculo común ha dado lugar a la definición de 5 nuevos indicadores: 4 de ellos relativos a las condiciones de iluminación natural, y 1 dedicado a la insolación del espacio.

Tres de estos indicadores describen en qué medida todos los puntos del plano de trabajo alcanzan una determinada iluminancia o rango de iluminancia durante la mitad del rango temporal considerado y el último describe durante cuánto tiempo la mitad de los puntos del plano de trabajo alcanzan una determinada iluminancia. Este último es similar al indicador de insolación, que describe durante cuánto se supera una irradiancia máxima.

This set of intercomparable metrics provides information about the amount of light and heat a space receives, its distribution of illuminance in different ranges and its levels of insolation. They therefore describe and integrate both the heat and light effects of global solar radiation entering the space.

To be able to determine the usefulness of the results provided by the different metrics, the necessary analysis criteria were also established and used to create a new methodology for calculating daylighting and insolation.

The new metrics established in this study were obtained by fulfilling the following objectives:

### 5.1.1 Analysis of Existing Metrics

*The nature and calculation bases of existing daylight and insolation metrics were analysed to identify their similarities and differences.*

*Daylight Factor (DF)* and *Daylight Autonomy (DA)* calculation bases were analysed, together with those corresponding to the full set of *Useful Daylight Illuminance (UDI)* metrics.

The primary datum of all these metrics is the amount of daylight received at each point studied on the workplane. This is the element they all have in common, but the *DF* metric covers diffuse illuminance whereas the *DA* and *UDI* metrics cover global illuminance.

The *DF* metric also establishes the relationship between the above mentioned workplane illuminance and outdoor diffuse horizontal illuminance, so the illuminance values it provides are always simultaneous (received at the same time), while the *DA* and *UDI* metrics calculate the whole annual illuminance profile, select a time range and analyse illuminances at every point on the workplane – meaning that the final result does not necessarily indicate that the values for illuminance on the workplane were obtained at the same time.

It should also be mentioned that the value for outdoor diffuse horizontal illuminance used in the *DF* metric to determine interior illuminance is usually obtained from tables and abaci based on statistical measurements of overcast skies, and therefore depends on the site's latitude. One of the shortcomings of the *DF* metric is therefore its isolation from local climate conditions: it tends to be similar in places with the same latitude.

The main differences between these metrics reside precisely in their degree of connection with climate conditions, the time ranges of their illuminance analyses and the simultaneity with which all the points on the workplane receive illuminance.

To characterise the sunlight entering a space, two different metrics are usually employed. With regard to illumination, the sunlight hours metric quantifies the hours of sunlight a point receives annually, but provides no information about the intensity of the incident solar radiation at that point or about the amount of solar radiation received there each hour.

The thermal aspect is addressed in terms of solar gain through windows, the values for which are obtained through energy simulations for the space in question.

Con este conjunto de indicadores, comparables entre sí, se obtiene información sobre la cantidad de luz y de calor que recibe el espacio, la distribución de las iluminancias en diferentes rangos y la insolación del espacio. Por tanto, estos indicadores describen e integran el aspecto lumínico y térmico del efecto de la entrada de la radiación solar global.

Además, para poder determinar la idoneidad de los resultados proporcionados por los diferentes indicadores se han establecido los criterios de análisis necesarios y con ellos se ha establecido una nueva metodología de cálculo de las condiciones de iluminación natural y de insolación.

Para el establecimiento de los nuevos indicadores en esta investigación se han cumplido los siguientes objetivos:

### 5.1.1 Análisis de los indicadores existentes

*Se ha analizado la naturaleza y las bases de cálculo de los indicadores de iluminación natural y de insolación existentes y se han detectado sus similitudes y sus diferencias.*

En este sentido, se ha analizado la base de cálculo del *Factor de Iluminación Natural (Daylight Factor -DF)*, de la *Autonomía de Iluminación Natural (Daylight Autonomy -DA)* y del conjunto de indicadores de la *Iluminancia Natural Útil (Useful Daylight Illuminance -UDI)*.

Por un lado, todos estos indicadores tienen como dato primario la iluminancia natural en cada punto de estudio del plano de trabajo, lo que constituye su elemento en común, pero el indicador *DF* trabaja con iluminancia difusa y los indicadores *DA* y *UDI* trabajan con iluminancias globales.

Por otro lado, el indicador *DF* establece la relación de esta iluminancia con la iluminancia difusa horizontal exterior, por lo que las iluminancias que proporciona siempre son simultáneas (se alcanzan en el mismo instante), y los indicadores *DA* y *UDI* calculan todo el perfil anual de iluminancias, seleccionan un rango temporal y realizan el análisis de iluminancias en cada punto del plano de trabajo por lo que el resultado final no implica que las iluminancias en el plano de trabajo se hayan obtenido en el mismo momento.

Además, cabe señalar que el valor de la iluminancia difusa horizontal exterior que se emplea para determinar las iluminancias interiores mediante la aplicación del indicador *DF* se obtiene normalmente mediante ábacos y tablas elaboradas a partir de datos estadísticos de mediciones de cielos nublados, dependiente de la latitud de la localización. Por tanto, el indicador *DF* adolece de una falta de conexión con las condiciones climáticas locales, siendo similar en localizaciones con la misma latitud.

Las principales diferencias entre estos indicadores residen, por tanto, en la conexión con las condiciones climáticas, en el rango temporal de análisis de iluminancias y en la simultaneidad con la que todos los puntos del plano de trabajo reciben iluminancias.

En cuanto a la caracterización del soleamiento en el espacio, normalmente se trabaja con dos indicadores diferentes. Por un lado, desde el lado lumínico, se encuentran las horas de soleamiento del espacio, que si bien proporcionan la cantidad de horas de sol anuales que recibe un punto, no contienen información sobre la intensidad de la radiación solar incidente en ese punto por lo que tampoco se puede saber la radiación solar que incide en cada hora.

Por otro lado, desde el ámbito térmico, se encuentran las ganancias solares a través de las ventanas, que se obtienen a través de la simulación energética del espacio.

The output data provided by simulation programs can be hourly data calculated over a time range of a whole year, producing an annual solar gain profile similar to the annual illuminance profile for a given point on the workplane. However, the solar gain through perimeter windows datum is one single value for the whole space: there is no distribution of values over the workplane.

The big difference between the metrics for sunlight hours and solar gain, therefore, is that the former provides the distribution of values over the workplane but offers no information about the intensity of the incident solar radiation whereas the latter provides information about the incident solar radiation but does not give the distribution of values over the workplane. In a way, both metrics can be considered to be complementary.

### **5.1.2 Common Calculation Framework**

*A common framework for calculation was established which allows descriptive results for daylight and insolation in a space to be compared in the same terms.*

Aware of the differences that exist between currently used daylighting and insolation metrics, a set of common calculation conditions was established so that the resulting metrics would have the same calculation bases and would therefore be intercomparable.

#### **5.1.2.1 Time Range**

---

To address the DF metric's lack of connection with local climate conditions, it was first proposed to obtain the outdoor diffuse horizontal illuminance value as expressed by the cumulative outdoor diffuse horizontal illuminance curve produced with data from the standardized climate record. This would link the outdoor illuminance value to the climate conditions.

*Annual daytime hours* were also defined as the *time range for the analysis of daylighting and insolation in a space*.

This way, outdoor diffuse horizontal illuminance – the value needed to calculate the illuminances obtained using the DF metric – could be obtained as the probability of occurrence in annual daytime hours, so it was then only necessary to define the percentage of the time range for which the outdoor horizontal illuminance was being calculated.

The analysis time range needed to obtain the DA and UDI metrics, which are based on a space's occupancy schedule, was also modified and established as the annual daytime hours, for analysis of solar gain through perimeter windows.

#### **5.1.2.2 Simultaneous Illuminances on the Workplane**

---

One of the advantages of the DF metric is that by defining an outdoor horizontal illuminance value it is possible to obtain the interior illuminances that are attained simultaneously at the points being studied on the workplane. This in turn makes it possible to evaluate the percentage of points on the workplane which receive a minimum amount of daylight at the same time, and thereby to assess daylight sufficiency.



En cuanto a los datos de salida de los programas de simulación se obtiene que pueden ser datos horarios calculados para un rango temporal de un año completo, dando lugar a un perfil anual de ganancias solares, similar al perfil anual de iluminancias en un punto. Sin embargo, el dato de ganancia solar a través de las ventanas exteriores es único para todo el espacio, por lo que no se tiene una distribución de valores en el plano de trabajo.

Por tanto, la gran diferencia entre las horas de soleamiento y las ganancias solares es que la primera proporciona la distribución de valores sobre el plano de trabajo pero no da información sobre la intensidad de la radiación solar incidente y la segunda proporciona información sobre la radiación solar incidente en el espacio pero no da una distribución de valores en el plano de trabajo. Ambos indicadores, pueden considerarse de alguna manera como complementarios.

### 5.1.2 Marco común de cálculo

*Se ha establecido un marco común de cálculo que permita la comparación en los mismos términos de resultados descriptivos de la iluminación natural y la insolación de un espacio.*

Sabiendo las diferencias existentes entre los actuales indicadores de iluminación natural y de insolación se han establecido unas condiciones comunes de cálculo de forma que los indicadores resultantes tengan las mismas bases de cálculo, por lo que son susceptibles de ser comparados entre sí.

#### 5.1.2.1 Rango temporal

En primer lugar, atendiendo a la falta de conexión con las condiciones climáticas locales del indicador  $DF$  se propone la obtención del valor de la iluminancia difusa horizontal exterior en función de la *curva de frecuencia acumulada de iluminancia horizontal difusa exterior* realizada con los datos provenientes del archivo climático estandarizado. De esta forma, el valor exterior está vinculado a las condiciones climáticas.

Además, se ha definido como **rango temporal de análisis de las condiciones de iluminación natural y de la insolación del espacio, las horas diurnas anuales.**

De esta forma la iluminancia difusa horizontal exterior, necesaria para el cálculo de las iluminancias obtenidas mediante el indicador  $DF$ , se obtiene como la probabilidad de ocurrencia en las horas diurnas anuales. Por tanto, queda pendiente definir el porcentaje del rango temporal para el que se calcula la iluminancia horizontal exterior.

Así también se modifica el rango temporal de análisis necesario para la obtención de los indicadores  $DA$  y  $UDI$ , que se basan en el horario de ocupación del espacio, y se establece como las horas diurnas anuales para el análisis de las ganancias solares a través de las ventanas exteriores.

#### 5.1.2.2 Simultaneidad de iluminancias en el plano de trabajo

Por otro lado, una de las ventajas del indicador  $DF$  es que, mediante la definición de un valor de la iluminancia horizontal exterior se obtienen las iluminancias interiores en los puntos de estudio del plano de trabajo que se alcanzan de forma simultánea. De esta forma es posible evaluar el porcentaje de puntos del plano de trabajo que alcanzan en el mismo instante una iluminancia natural mínima, permitiendo emitir un juicio sobre la suficiencia de las condiciones de iluminación natural.

The *DA* and *UDI* metrics, however, since they are based on accumulative analysis at each point on the workplane, provide information about the percentage of the time range during which each point receives a given illuminance or range of illuminances. This does not permit analysis of the illuminance received by all the points on the workplane as a whole because the levels of illuminance received simultaneously are not known.

To overcome this problem, it was decided to **analyse the hourly illuminance profile at each moment** before carrying out the cumulative analysis. This gave **the percentage of points on the workplane which exceed a minimum level of illuminance** or receive a given range of illuminance **at each moment**. This data constitutes a time profile for the percentage of the workplane which receives a minimum level or range of illuminance, so to carry out the time analysis it was therefore necessary to define the lighting requirements.

The time analysis, like that carried out with the *DF* metric, made it possible to determine the amount of the workplane which meets a given lighting requirement over a given percentage of the time range.

### 5.1.2.3 Solar Radiation on the Workplane

---

Regarding solar gain through windows, it was concluded that the primary data output from the energy simulation for a building, since it constitutes an annual hourly profile for the whole space, can be considered equivalent to the data obtained from a time analysis of the annual hourly illuminance profile in terms of significance and calculation bases.

However, solar thermal gain represents the total amount of heat entering through the window. In view of this, it was considered necessary to obtain the impact of that value on the workplane surface, but such a quantification would imply uniform distribution of the radiation over the workplane - something which does not actually occur: it would show neither the directionality of the incoming solar radiation nor how it falls on the workplane to form solar patches.

One solution considered was to address the distribution of values over the workplane in terms of the annual distribution of sunlight hours, but this would have assumed that the intensity of the incoming solar radiation was constant throughout the year.

Another possibility was to use the *DAYSIM* program to obtain the annual profile for incident radiation at each point on the workplane, in the same way that it can be used to obtain the annual illuminance profile. However, it remains unclear whether the incident radiation calculated by *DAYSIM* is global solar radiation, across the whole spectrum, or only solar radiation within the spectral range of the region visible when a constant conversion factor is applied.

In the face of such uncertainty, it was decided to work with data physically closer to reality, and so no directly comparable primary datum was obtained. That is to say, **it was not possible to correlate illuminance and incident solar radiation at each point in the space**.

It is, however, possible to correlate the effects of solar gain through windows with global workplane performance, taking this to be representative of the whole space being studied.

To truly connect both aspects of solar radiation, more sophisticated simulation software is clearly required. Research in this field is ongoing.

Sin embargo, los indicadores *DA* y *UDI*, al basarse en un análisis acumulativo en cada punto del plano de trabajo, aportan información sobre el porcentaje del rango temporal en que cada punto alcanza una determinada iluminancia o rango de iluminancias. Como resultado de este análisis, no es posible realizar el análisis de las iluminancias del conjunto de puntos del plano de trabajo, ya que se desconoce qué iluminancias se obtienen en el mismo instante.

Para solventar esta cuestión se ha propuesto el **análisis en cada instante del perfil horario de iluminancias**. De esta forma, antes de realizar el análisis acumulativo, **se obtiene el porcentaje de puntos del plano de trabajo que en cada instante supera un nivel mínimo de iluminancias**, o que alcanza un determinado rango de iluminancias. Estos datos constituyen un perfil horario de porcentaje del plano de trabajo que alcanza un nivel mínimo de iluminancia o rango de iluminancias. Por tanto, es necesario definir los requisitos luminotécnicos para realizar el análisis temporal.

Una vez realizado este análisis, similar al que se realiza con el indicador *DF*, se puede determinar la cobertura del plano de trabajo que supera un determinado requisito luminotécnico para un determinado porcentaje del rango temporal.

### 5.1.2.3 Radiación solar en el plano de trabajo

---

En lo que respecta a las ganancias solares a través de las ventanas, se concluye que los datos primarios de salida de la simulación energética de un edificio, al constituir un perfil horario anual de ganancias para todo el espacio, son equiparables a los que se obtendrían con el análisis temporal del perfil horario anual de iluminancias, en cuanto a su significancia y bases de cálculo.

Sin embargo, la ganancia solar térmica representa la entrada total de calor a través de la ventana. En este sentido se planteó la obtención de la repercusión de dicho valor sobre la superficie del plano de trabajo, pero efectuar dicha operación supondría la distribución homogénea de dicha radiación sobre el plano, lo cual no corresponde con la realidad: no muestra la direccionalidad de la radiación solar ni cómo incide en el plano de trabajo formando las manchas solares.

También se planteó la aproximación a la distribución de valores en el plano de trabajo mediante la distribución de horas de soleamiento anuales. Sin embargo, esta suposición se planteaba considerando una intensidad constante de la radiación solar a lo largo del año.

Por otro lado, mediante el programa *DAYSIM*, se puede obtener el perfil anual de radiación incidente en cada punto del plano, de forma similar a la obtención del perfil anual de iluminancias; sin embargo, no ha llegado a clarificarse si la radiación incidente que calcula *DAYSIM* es la radiación solar global, en todo el espectro, o sólo la radiación solar en rango espectral de la región visible mediante la aplicación de un factor constante de conversión.

Ante tal incertidumbre, se ha optado por trabajar con los datos físicamente más próximos a la realidad, por lo que no se ha logrado obtener un dato primario que pueda ser directamente comparable. Es decir, **no se ha podido obtener la correlación entre la iluminancia y la radiación solar incidente en cada punto del espacio**.

No obstante, los efectos de las ganancias solares a través de las ventanas sí pueden ser correlacionados con el comportamiento global del plano de trabajo, considerándolo como representativo de todo el espacio de estudio.

Para obtener una verdadera conexión entre ambos aspectos de la radiación solar, por tanto, es necesario un mayor avance en los programas de simulación, ámbito que está en continuo desarrollo.

It should not be forgotten that the simulation of ambient environments in buildings involves the use of statistical climate data: models incorporate different types of simplifications and the resulting divergence between measured and simulated data means that the results obtained in research projects like this can only be taken as approximations to reality.

### **5.1.3 Analysis Criteria**

*The State-of-the-Art was reviewed to establish the criteria that would be needed to analyse the values obtained with the new metrics in such a manner as to be able to evaluate the resulting conditions.*

#### **5.1.3.1 Daylight Sufficiency**

---

Once the calculation bases had been established for the daylighting metrics, it was found that it was necessary to define analysis criteria regarding lighting requirements, the minimum percentage of daytime hours in which the lighting objectives should be fulfilled and minimum workplane coverage with a given level of illuminance.

A review of the State-of-the-Art with regard to daylighting metrics showed that in the most recent regulatory documents sufficient daylight in a space is defined as natural light conditions in which a minimum illuminance of 300 lux is attained by 50% of the points monitored on a workplane for 50% of the time range.

#### **5.1.3.2 Useful Illuminance Range**

---

Having adopted the aforementioned illuminance, coverage and time range requirements, it was observed that the minimum value of 300 lux is insufficient when fine-tuning daylighting for in a space. Accordingly, since useful illuminance levels suitable for visual tasks cannot be defined using a minimum value, it was decided to use the illuminance ranges from the *UDI* metric. However, although the ranges currently covered by this metric (<100 lux, 100-300 lux, 300-3000 lux and >3000 lux) do identify light ranges that are either too high or too low to be useful, they offer no means of linking levels of daylight with the performance of visual tasks.

This study therefore considers several different illuminance requirements. The minimum value of 300 lux and most of the ranges in the *UDI* metric were retained, but to facilitate correlation with visual tasks the 300-3000 lux range was divided into two, inserting a new threshold of 500 lux.

#### **5.1.3.3 Maximum Irradiance**

---

Having established the lighting analysis criteria, the next task was to establish a maximum value for solar gain through windows which would make it possible to decide whether the amount of energy entering through the window is large or small.

Since the spaces considered in the study were not acclimatized, a documentary search was carried out for information about the relationship between solar radiation entering a space through windows and its effects on users' behaviour. The data acquired made it possible to define the relationship that exists between the amount of energy falling on a window and the likelihood that users will feel the need to block it using shading devices.

En este contexto no se debe olvidar que el campo de la simulación de las condiciones ambientales de un edificio trabaja con datos climatológicos estadísticos y se asumen diversas simplificaciones en los modelos que resultan en divergencias entre los datos medidos y los simulados, por lo que los resultados que se muestran en esta investigación son una aproximación a la realidad.

### 5.1.3 Criterios de análisis

*A partir de la revisión del Estado del Arte, se han establecido los criterios necesarios para analizar los valores obtenidos con los nuevos indicadores de forma que permitan emitir un juicio sobre las condiciones obtenidas.*

#### 5.1.3.1 Suficiente Luz Natural

---

Establecidas las bases de cálculo de los indicadores de iluminación natural se obtiene que es necesario definir criterios de análisis relativos a los requisitos de iluminancia, al porcentaje de las horas diurnas mínimo en que se debe conseguir el objetivo luminotécnico y a la cobertura mínima del plano de trabajo con una determinada iluminancia.

De la revisión del Estado del Arte referente a los indicadores de iluminación natural se obtiene que en los últimos documentos legislativos se define como suficiente luz natural de un espacio aquellas condiciones de iluminación natural en las que se obtiene una iluminancia mínima de 300 lux alcanzado por el 50% de los puntos de estudio del plano de trabajo durante el 50% del rango temporal.

#### 5.1.3.2 Rango de iluminancias útiles

---

Adoptado este requisito de iluminancia, cobertura y rango temporal se observa que el valor mínimo de 300 lux es insuficiente para afinar las condiciones de iluminación natural de un espacio. De hecho, precisamente porque un valor mínimo no permite identificar la ocurrencia de iluminancias útiles para el desarrollo de las tareas visuales, se establecieron los rangos de iluminancia correspondientes al indicador *UDI*. No obstante, los rangos que actualmente contempla este indicador (<100 lux, 100-300 lux, 300-3000 lux y >3000 lux) si bien permiten discriminar rangos de iluminancias que no son útiles por ser excesivamente bajas o altas, no permite vincular las condiciones de iluminación natural con el desarrollo de las tareas visuales.

Es por ello que en esta investigación se contemplan varios requisitos de iluminancias. Por un lado se mantiene el valor mínimo de 300 lux y la mayoría de los rangos de *UDI*, pero, para promover la vinculación con las tareas visuales, se divide el rango de 300-3000 lux en dos, insertando el límite de 500 lux.

#### 5.1.3.3 Irradiancia límite

---

Una vez establecidos los criterios de análisis de las condiciones de iluminación se plantea el establecimiento de un valor límite de las ganancias solares a través de las ventanas que permita decidir si la cantidad de energía que entra por la ventana es mucha o poca.

Considerando que esta investigación se realiza sobre espacios no climatizados, se realizó una búsqueda documental sobre la relación entre la radiación solar a través de las ventanas y sus consecuencias en el comportamiento de los ocupantes del espacio. Esta búsqueda llevó a obtener la relación entre la cantidad de energía que incide sobre una ventana y la propensión a bloquearla mediante dispositivos de protección solar.

The established maximum threshold of  $150 \text{ W/m}^2$  thus correlates solar gain through windows with the likelihood that the solar energy entering a space will have to be blocked to alleviate overheating or glare.

#### 5.1.3.4 New Metrics

---

By unifying calculation bases and establishing analysis criteria it was possible to define five new, intercomparable metrics describing the daylighting and insolation conditions in a space:

1. *Diffuse Daylight Sufficiency (DSd)*: the percentage of the workplane that simultaneously receives 300 lux of exclusively diffuse daylight 50% of daytime hours, as quantified in data collected from climate records.
2. *Global Daylight Sufficiency (DSg)*: the percentage of the workplane that simultaneously receives 300 lux of global daylight 50% of daytime hours, as quantified in data collected from climate records.
3. *Maintained Daylight Sufficiency (DSm)*: the percentage of hours in which 50% of the workplane sensors simultaneously receive 300 lux of daylight, as quantified in data collected from climate records.
4. *Simultaneous Useful Daylight Illuminance (sUDI<sub>range</sub>)*: a set of 5 metrics showing the percentage of the workplane that simultaneously attains 5 different daylight-only illuminance ranges (<100 lux, 100-300 lux, 300-500 lux, 500-3000 lux and >3000 lux) during daytime hours, as quantified in data collected from climate records.
5. *Excessive Solar Heat Gain (SHGe)*: the percentage of daytime hours in which solar gain through perimeter openings is so high that it represents irradiance on the openings equal to or higher than  $150 \text{ W/m}^2$ .

#### 5.1.4 New Methodology

*Having defined the new metrics and their corresponding analysis criteria, a methodology was created with which to calculate them, specifying how the primary data obtained from the simulation is to be processed.*

Taking into account the nature of each primary datum and the metric's calculation bases and analysis criteria, a data processing procedure for obtaining the different metrics was defined, providing descriptive and analytical results for daylighting and insolation conditions in a space.

##### 5.1.4.1 Diffuse Daylight Sufficiency (DSd)

---

The criteria for exclusively diffuse daylight sufficiency was determined and applied taking as a starting point the distribution of *Daylight Factor (DF)* values on the workplane, which maintains a constant relationship with the value for outdoor diffuse horizontal illuminance.

El valor de  $150 \text{ W/m}^2$  establecido como límite máximo, por tanto, correlaciona las ganancias solares a través de las ventanas con la propensión a bloquear dicha entrada debida bien a una situación de sobrecalentamiento o a una situación de deslumbramiento.

#### 5.1.3.4 Nuevos indicadores

Mediante la unificación de las bases de cálculo y el establecimiento de los criterios de análisis ha sido posible definir cinco nuevos indicadores que describen las condiciones de iluminación natural y de insolación de un espacio, con la capacidad de ser comparables entre sí:

1. *Suficiencia de Iluminación Natural Difusa (Diffuse Daylight Sufficiency -DSd)*: porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente  $300 \text{ lux}$  durante el 50% de las horas diurnas mediante exclusivamente la componente difusa de la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.
2. *Suficiencia de Iluminación Natural Global (Global Daylight Sufficiency -DSg)*: porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente  $300 \text{ lux}$  durante el 50% de las horas diurnas debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.
3. *Suficiencia de Iluminación Natural Mantenido (Maintained Daylight Sufficiency -DSm)*: porcentaje de horas en que se alcanzan simultáneamente  $300 \text{ lux}$  en el 50% de los sensores del plano de trabajo debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.
4. *Iluminancia Natural Útil Simultánea (Simultaneous Useful Daylight Illuminance -sUDI<sub>range</sub>)*: conjunto de 5 indicadores que muestran el porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente 5 rangos diferentes de iluminancia ( $100 \text{ lux}$ ,  $100\text{-}300 \text{ lux}$ ,  $300\text{-}500 \text{ lux}$ ,  $500\text{-}3000 \text{ lux}$  y  $>3000 \text{ lux}$ ) durante las horas diurnas debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.
5. *Insolación Excesiva (Excessive Solar Heat Gains -SHGe)*: porcentaje horas diurnas en que se supera una ganancia solar a través de los huecos exteriores tal que suponga una irradiancia sobre los mismos mayor o igual a  $150 \text{ W/m}^2$ .

#### 5.1.4 Nueva metodología

*Una vez definidos los nuevos indicadores y establecidos sus correspondientes criterios de análisis, se ha establecido la metodología de cálculo de estos indicadores, donde se especifica el tratamiento de datos a realizar sobre los datos primarios obtenidos de la simulación.*

Según la naturaleza de cada dato primario y en función de las bases de cálculo y los criterios de análisis se han definido los procedimientos para el tratamiento de estos datos de forma que se obtengan los diferentes indicadores, obteniéndose resultados descriptivos y resultados analíticos de las condiciones de iluminación natural y de insolación del espacio.

##### 5.1.4.1 Suficiencia de iluminación natural difusa (DSd)

Para la determinación y aplicación del criterio de suficiente iluminación natural debido exclusivamente a la componente difusa de la iluminación natural se parte de la distribución de valores de *Factor de Iluminación Natural (DF)* en el plano, que guarda una relación constante con el valor de iluminancia difusa horizontal exterior.

The procedure to be followed is based on determining outdoor diffuse horizontal illuminance using the data contained in the standardized climate record for the site in question, which includes hourly values during the course of a year.

First, the values corresponding to annual night-time hours are discriminated, leaving only daytime values, and these are then used to obtain the cumulative curve corresponding to outdoor diffuse horizontal illuminance.

Since the daylight sufficiency requirement specifies a given illuminance with a given workplane coverage over 50% of the considered time range, the cumulative curve is then used to obtain the median value for each month of the year and for the year as whole. With the design illuminance set at the value of 300 lux established in the daylight sufficiency criteria, this value is then used to determine the minimum monthly and yearly *DF* value corresponding to the local climate conditions.

Once the distribution of *DF* values over the workplane and the minimum monthly and annual *DF* value are known, the percentage of the workplane which monthly and yearly exceeds that minimum value is obtained. This is the *Diffuse Daylight Sufficiency (DSd)* metric.

Thus, to evaluate whether there is sufficient diffuse daylight, the monthly and/or annual value should be greater than 50% of the workplane.

This procedure provides a time evolution for this metric, which is complemented by the distribution of *DF* values on the workplane (values which remains constant throughout the year).

#### **5.1.4.2 Global Daylight Sufficiency (DSg)**

---

The primary datum which determines this metric is the annual profile of hourly illuminance values at each point studied on the workplane. The annual profile includes daytime and night-time values, so the first step is to discriminate the illuminance values corresponding to the night-time hours.

As in the previous case, these hours are discriminated by analysing the outdoor diffuse horizontal light values in the climate records corresponding to the model's location. Those values equal to zero are taken to indicate night-time hours.

The discrimination of hourly values in the climate records serves to eliminate the corresponding values in the annual illuminance profile obtained through the lighting simulation for the space in question, leaving only the daytime values.

With the minimum illuminance set at 300 lux, the time evolution of those values is then analysed to determine what percentage of the points being studied on the workplane simultaneously equal or exceed that minimum value. The procedure thus produces a profile of hourly workplane coverage values with simultaneous illuminance equal to or greater than 300 lux.

The hourly workplane coverage profile can be used to determine the coverage obtained for 50% of the time range. This is the *Global Daylight Sufficiency (DSg)* metric. In this study, both monthly and yearly median values were obtained, so as to produce values equivalent to the workplane coverage values in *the Diffuse Daylight Sufficiency* metric.

Thus, to evaluate whether there is sufficient daylight, the monthly and/or yearly value should be greater than 50% of the workplane.



El procedimiento a seguir se basa en la determinación de esta iluminancia difusa horizontal exterior en función de los datos contenidos en el archivo climático estandarizado de la localización de estudio, que contiene valores horarios a lo largo de un año.

Para ello, en primer lugar se discriminan los valores correspondientes a las horas nocturnas anuales, quedando sólo los valores diurnos, con los que se obtiene la *curva de frecuencia acumulada de iluminancia difusa horizontal exterior*.

Como el requisito de suficiente iluminación natural determina la obtención de una determinada iluminancia con una determinada cobertura para el 50% del rango temporal considerado, se procede a obtener, mediante la *curva de frecuencia acumulada*, el valor mediano para cada mes del año y la mediana anual. Con este valor se determina, fijando como iluminancia de diseño 300 lux, establecido en el criterio de suficiente iluminación natural, el valor *DF* mínimo mensual y anual en función de las condiciones climáticas.

Conocidos, por tanto, la distribución de valores *DF* en el plano y el valor *DF* mínimo mensual y anual, se obtiene el porcentaje del plano de trabajo que mensualmente y anualmente, supera dicho valor mínimo, que constituye el indicador *Suficiencia de iluminación natural difusa (DSd)*.

Por tanto, para evaluar si se obtiene una suficiente iluminación natural debido a la componente difusa, el valor mensual y/o anual debe ser mayor del 50% del plano de trabajo.

Debido al procedimiento aplicado se obtiene una evolución temporal de este indicador, que se complementa con la distribución de valores *DF* en el plano de trabajo; distribución que se mantiene constante a lo largo del año.

#### 5.1.4.2 Suficiencia de iluminación natural global (DSg)

Para la determinación de este indicador el dato primario es el perfil anual de valores horarios de iluminancia en cada punto de estudio del plano de trabajo. Este perfil anual contempla los valores diurnos y nocturnos, por lo que el primer paso consiste en la discriminación de los valores de iluminancia correspondientes a las horas nocturnas.

Al igual que en el caso anterior esta discriminación se realiza mediante el análisis de los valores de iluminancia difusa horizontal exterior contenidos en el archivo climático de la localización del modelo. Si este valor era igual a cero se consideraba como hora nocturna.

Mediante esta discriminación de valores horarios en el archivo climático se eliminan los valores correspondientes en el perfil anual de iluminancias resultante de la simulación lumínica del espacio, quedando, por tanto, sólo los valores diurnos.

A continuación, fijando como iluminancia mínima 300 lux, se realiza el análisis temporal de los valores para determinar qué porcentaje de los puntos de estudio alcanza o supera este valor de iluminancia en el mismo instante. En este proceso se obtiene, por tanto, un perfil de valores horarios de cobertura del plano de trabajo con una iluminancia simultánea igual o mayor de 300 lux.

Con este perfil de cobertura horaria se puede determinar cuál es la cobertura que se obtiene para el 50% del rango temporal, lo que constituye el indicador *Suficiencia de Iluminación Natural global (DSg)*. En esta investigación se han obtenido los valores medianos mensuales y el valor mediano anual, para ser equiparables con los valores de cobertura del plano de trabajo del indicador *Suficiencia de Iluminación natural difusa*.

Por tanto, para evaluar si se obtiene una suficiente iluminación natural, el valor mensual y/o anual debe ser mayor del 50% del plano de trabajo.

As a result of this procedure, this metric shows the time evolution of a space's lighting conditions without providing any information about the distribution of illuminance over the workplane.

#### **5.1.4.3 Maintained Daylight Sufficiency (DSm)**

---

The procedure established to determine this metric is very similar to that defined to obtain the *Global Daylight Sufficiency* metric.

In this case, after having obtained the profile of hourly workplane coverage values for a simultaneous illuminance equal to or greater than 300 lux, instead of extracting the monthly and yearly median values, it was noted how many times per month and per year the workplane coverage was equal to or above 50%.

This gave the percentage of daytime hours in which the workplane attained a level of illuminance equal to or greater than 300 lux on at least 50% of its surface. This is the *Maintained Daylight Sufficiency (DSm)* metric.

As with the other two metrics, a time evolution chart was plotted for maintained daylight conditions in the space, although, again, no information was provided about the distribution of illuminance over the workplane.

#### **5.1.4.4 Simultaneous Useful Daylight Illuminance (sUDI)**

---

The set of values which constitute this metric is created by dividing up the illuminance received by the workplane into different ranges. Instead of the illuminance ranges proposed in the original Useful Daylight Illuminance (UDI) metric, this study established ranges which corresponded to specific visual task requirements.

- 0 to 100 lux: Transit or short period reception areas. Infrequently occupied spaces. Visual tasks limited to movement, with little need to perceive details.
- 100 to 300 lux: Low precision tasks: occasional need to perceive details. Continuously occupied interior spaces, with visual tasks requiring no perception of detail.
- 300 to 500 lux: Medium precision tasks. Continuously occupied interior spaces, with simple visual tasks (large or well contrasted details)
- 500 to 3000 lux: High precision tasks. Interior spaces with difficult visual tasks, where it is important to distinguish small details.
- >3000 lux: Very high precision tasks. Interior spaces with activities that demand extremely detailed attention or attention to details when there is poor visual contrast.

The procedure adopted to obtain these values was very similar to the one used to obtain the *Global Daylight Sufficiency (DSg)* metric.

First, night-time values were discriminated to obtain an hourly illuminance profile for annual daytime hours. A time analysis was then carried out on the profile.

Como resultado de este procedimiento, este indicador muestra una evolución temporal de las condiciones de iluminación del espacio, sin dar información sobre la distribución de iluminancias en el plano de trabajo.

#### 5.1.4.3 Suficiencia de iluminación natural mantenida (DSm)

---

El procedimiento definido para la determinación de este indicador es muy similar al definido para la obtención del indicador *Suficiencia de iluminación natural global*.

En este caso, una vez obtenido el perfil de valores horarios de cobertura del plano de trabajo con una iluminancia simultánea igual o mayor de 300 lux, en vez de obtener el valor mediano mensual y anual, se cuenta el número de veces, en el mes y en el año, el plano de trabajo alcanza una cobertura igual o mayor del 50%.

De esta forma se obtiene el porcentaje de horas diurnas en que el plano de trabajo alcanza una iluminancia igual o mayor de 300 lux en al menos el 50% del plano de trabajo, lo que constituye el indicador *Suficiencia de iluminación natural mantenida (DSm)*.

Al igual que en los otros dos indicadores, se obtiene una evolución temporal del mantenimiento de unas condiciones mínimas de iluminación natural en el espacio. En este caso tampoco se aporta información sobre la distribución de iluminancias en el plano de trabajo.

#### 5.1.4.4 Iluminancia natural útil simultánea (sUDI)

---

Este conjunto de valores que constituyen este indicador se basa en la clasificación de las iluminancias que tiene el plano de trabajo en diferentes rangos. Frente a los rangos definidos en el indicador original, Iluminancia natural útil (UDI), en esta investigación se han establecido los rangos de iluminancia en función de las tareas visuales:

- 0 a 100 lux: Áreas de circulación o que sean objeto de visitas cortas. Locales de ocupación no habitual. Tareas visuales confinadas al movimiento y una pequeña percepción de detalles.
- 100 a 300 lux: Tareas con bajo nivel de precisión: percepción ocasional de detalles. Interiores continuamente ocupados, con tareas visuales sin percepción de detalles.
- 300 a 500 lux: Tareas con un nivel de precisión medio. Interiores continuamente ocupados, con tareas visuales sencillas (detalles grandes o con contraste).
- 500 a 3000 lux: Tareas con altos niveles de precisión. Interiores con tareas visuales difíciles, indispensable fina distinción de detalles.
- >3000 lux: Tareas con niveles de precisión muy altos. Interiores con actividades que exijan una distinción extremadamente fina o bajo condiciones de contraste extremadamente difíciles.

El procedimiento seguido para la obtención de este conjunto de valores es muy similar al definido para la obtención del indicador *Suficiencia de iluminación natural global (DSg)*.

En primer lugar se discriminan los valores nocturnos para obtener un perfil horario de iluminancias correspondientes a las horas diurnas anuales. A continuación se realiza el análisis temporal de este perfil.

In this case, instead of setting a single minimum threshold of 300 lux, different thresholds were established corresponding to the different illuminance ranges. The workplane coverage value corresponding to the moment when illuminances are attained in each range constitutes the *Simultaneous Useful Daylight (sUDI)* metric.

This process provides 5 time profiles for workplane coverage, but does not provide any information about the distribution of illuminance values on the workplane. Furthermore, this metric lacks the analysis criteria needed to evaluate whether the daylighting is suitable or not. In this case, evaluation is provided by the visual task that is habitually performed in the space being studied and which therefore requires sufficient light.

However, taking into account the high probability of glare at levels of illuminance higher than 3000 lux, the criteria for daylight sufficiency can be met in a range of illuminance values which, while adequate are not excessive: that is to say, between 300 and 3000 lux.

To this end, the hourly daytime daylight illuminance profile was used to carry out a time analysis, setting a minimum value of 300 lux and a maximum value of 3000 lux. The process also provided a time profile for workplane coverage when illuminances between those two thresholds were attained simultaneously.

#### **5.1.4.5 Excessive Solar Heat Gain (SHGe)**

---

The prime datum in this metric was an annual hourly profile for solar gain through windows obtained through energy simulation. The hourly profile contained daytime and night-time values, so the first step was to discriminate the annual night-time values to be able to analyse only the daytime values.

Criteria for evaluating solar gain were defined by establishing a maximum threshold value for irradiance falling on the window. Knowing the surface area of the window, it was thus possible to obtain the maximum level of solar gain, above which there exists a certain likelihood that users will block the solar radiation entering the space to avoid glare and/or overheating.

Having obtained a maximum value, the number of hours within a given time range that solar gain exceeded that maximum solar gain threshold was then counted, the resulting value constituting the *Excessive Solar Heat Gain (SHGe)* metric. This process provided monthly and yearly values which could then be compared with the Daylight Sufficiency metrics.

This metric therefore also expresses hourly and monthly time evolution, but this time for a space's level of insolation, without providing any information about the distribution of values on the workplane.

Furthermore, knowing the percentage of daytime hours in which solar gain is equal to or greater than an irradiance equivalent to  $150 \text{ W/m}^2$  in each month, together with the annual percentage, it is possible to establish the correlation between solar gain and the probability of glare by using the percentile function to calculate the monthly and annual  $sUDI_{>3000}$  value that corresponds to the *SHGe* (%h) percentile for each period.

En este caso, en vez de fijar un único límite inferior de 300 lux, se fijan diferentes límites, correspondientes a los diferentes rangos de iluminancia, y se determina la cobertura del plano de trabajo que en ese instante alcanza iluminancias en cada uno de los rangos, constituyendo así el indicador *Iluminancia Natural Útil simultánea (sUDI)*.

Este proceso proporciona 5 perfiles temporales de cobertura del plano de trabajo, pero no proporcionan información sobre la distribución de los valores de iluminancia en el plano de trabajo. Además, sobre este indicador no existen criterios de análisis que permitan evaluar si las condiciones de iluminación natural son adecuadas o no. En este caso, la evaluación vendrá dada por la tarea visual que normalmente se desarrolla en el espacio de estudio y que, por tanto, se deberá fomentar.

Sin embargo, considerando el criterio de suficiente iluminación natural y que a partir de 3000 lux es probable que se presenten condiciones de deslumbramiento, se puede aplicar este criterio al rango de iluminancias suficientes pero no excesivas, es decir, de 300 a 3000 lux.

Para ello, con el perfil horario de iluminancias naturales diurnas se realiza el análisis temporal fijando como límite inferior 300 lux y como límite superior 3000 lux. Este proceso también proporciona un perfil horario de cobertura del plano de trabajo que simultáneamente alcanza iluminancias comprendidas entre ambos límites.

#### 5.1.4.5 Insolación excesiva (SHGe)

---

De la simulación energética se obtiene un perfil horario anual de ganancias solares a través de las ventanas, que constituye el dato primario de este indicador. Este perfil horario contiene valores anuales diurnos y nocturnos, por lo que el primer paso es la discriminación de los valores nocturnos anuales para analizar sólo los valores diurnos.

Por otro lado, el criterio definido para evaluar las ganancias solares se basa en el establecimiento de una irradiancia límite sobre la ventana. Por lo que conocida la superficie de la ventana se puede obtener cuál es la ganancia solar límite, a partir de la cual existe una cierta probabilidad de que se produzcan situaciones de deslumbramiento y sobrecalentamiento, por lo que el usuario bloqueará la entrada de la radiación solar en el espacio.

Obtenido este valor límite queda por tanto contabilizar cuántas horas, dentro de un rango temporal, las ganancias solares son mayores que la ganancia solar límite, lo cual constituye el indicador *Insolación excesiva (SHGe)*. En este proceso se obtienen los valores mensuales y el valor anual para poder compararlos con los indicadores de Suficiencia de Iluminación Natural.

Este indicador, por tanto, también expresa una evolución temporal horaria y mensual pero de las condiciones de insolación del espacio, sin aportar información sobre la distribución de valores en el plano de trabajo.

Además, teniendo el porcentaje de horas diurnas en las que se obtienen unas ganancias solares mayores o iguales a una irradiancia equivalente a  $150 \text{ W/m}^2$  para cada mes y el porcentaje anual, se puede obtener la correlación entre las ganancias solares y la probabilidad de deslumbramiento calculando el valor mensual y anual de  $sUDI_{>3000}$  que corresponde con el percentil de  $SHGe$  (%h) de cada periodo mediante la función percentil.

#### 5.1.4.6 Graphic Representation

---

In the field of daylighting, the distribution of illuminance, sunlight hours or DF metric values on the workplane is extremely helpful in indicating the directionality of incoming daylight and identifying areas that are overexposed or require artificial lighting. This form of expression, however, provides no information about the time evolution of the illuminance attained on the workplane.

In contrast, in the field of energy, since spaces are calculated on a nodal basis and the result is a single hourly value, results are usually shown as time evolution charts and no information is provided about the distribution of values on the workplane.

Nevertheless, both these forms of representation are complementary and necessary if quantitative and qualitative data is to be provided about interior ambient conditions.

As explained above, all the new daylighting and insolation metrics provide time profiles. The best form of representing each profile varies depending on the way it changes over time.

For hourly profiles, obtained for the *sUDI* and *SHGe* metrics, one of the clearest formats – and one that is gradually being standardized – is that of time charts. These charts plot time evolution both for the illuminance received on the workplane and for the solar gain received by the space in question. They do not, however, provide any information about the distribution of values on the workplane.

To fully describe daylighting and insolation, therefore, false colour maps were created, showing the distribution of illuminance and incident solar radiation values on the workplane.

This was done using the distribution of DF values, which constitutes the primary datum of the *DSd* metric. However, these values only consider the diffuse component of daylight, as opposed to the *sunlight hours* values, which consider only direct sunlight and provide no information about the intensity of the incident solar radiation. Combining the two therefore gives the global distribution of daylight in a space.

To describe insolation, and considering the available resources, the distribution of annual mean hourly values for incident solar radiation on the workplane is shown. This representation takes into account how the data is processed by the simulation software before presentation: i.e., it is a statistical approximation to reality.

Apart from the results describing daylighting and insolation in the space, the results obtained for each metric show monthly time evolution and provide the annual value as a representative value in time.

The best format for representing monthly evolution and the evolution of the models within a series in terms of their annual values is in line or bar graphs. These types of graph are also ideal for showing the evolution of the metrics and global analysis results for all the series.

#### 5.1.4.6 Expresión gráfica

En el campo de la iluminación natural la distribución de valores en el plano de trabajo, ya sea de iluminancias, de horas de soleamiento o del indicador  $DF$ , es de gran utilidad para mostrar la direccionalidad de la iluminación natural, detectar las zonas sobreexpuestas o las zonas que requieren de iluminación artificial. Esta forma de expresión, sin embargo, no proporciona información sobre la evolución temporal de iluminancias en el plano de trabajo.

Sin embargo, en el ámbito energético, debido al cálculo nodal de los espacios, que da lugar a un único valor horario, los resultados se muestran como gráficas de evolución en el tiempo de valores. Esta forma de expresión, sin embargo, no proporciona información sobre la distribución de valores en el plano de trabajo.

No obstante, ambos medios de expresión son complementarios y necesarios para proporcionar información cuantitativa y cualitativa de las condiciones ambientales interiores.

Tal como se ha expuesto anteriormente, todos los nuevos indicadores de iluminación natural y de insolación proporcionan perfiles temporales. En función del paso temporal de cada perfil el medio de expresión más adecuado difiere.

En el caso del perfil horario, que se obtiene para los indicadores  $sUDI$  y  $SHGe$ , uno de los formatos con mayor expresividad y que poco a poco se están normalizando son los mapas temporales. Con estos mapas se describe la evolución temporal tanto de la iluminación recibida en el plano de trabajo como de las ganancias solares que obtiene el espacio. Sin embargo, estos mapas no proporcionan información sobre la distribución de valores en el plano de trabajo.

Por tanto, para completar la descripción de las condiciones de iluminación natural y de insolación se crean mapas de falso color que muestren la distribución de valores de iluminancia y de radiación solar incidente sobre el plano de trabajo.

Para ello se cuenta, por un lado, con la distribución de valores de  $DF$ , que constituye el dato primario del indicador  $DSd$ . Sin embargo estos valores sólo consideran la componente difusa de la iluminación natural. Por otro lado, la distribución de valores de *horas de soleamiento* sólo considera la componente directa, pero sin información sobre la intensidad de la radiación solar incidente. La conjunción de ambos, por tanto, muestra la distribución global de la iluminación natural en un espacio.

Además, para describir las condiciones de insolación, considerando los medios disponibles, se muestra la distribución de valores medios horarios anuales de la radiación solar incidente sobre el plano de trabajo, siendo conscientes del tratamiento estadístico que realiza el programa de simulación antes de mostrar los datos. Es decir, que muestra una aproximación estadística de la realidad.

Aparte de los resultados que describen las condiciones de iluminación natural y de insolación del espacio, los resultados que se obtienen para cada indicador muestran una evolución temporal mensual, además de obtener el valor anual como representativo en el tiempo.

Para mostrar la evolución mensual y la evolución de los modelos dentro de una serie, expresada mediante sus valores anuales, las gráficas de línea o de barra son las más adecuadas. Así también para mostrar la evolución de los indicadores y realizar el análisis global de todas las series.

## 5.2 The Impact of Architectural Strategies

Having defined the new calculation methodology, an experiment was designed considering the main architectural strategies that affect daylighting and insolation in interior spaces.

Each strategy constituted a separate calculation series, with different possible variations being defined for each series to cover the whole range. Using this methodology, each calculation model could be characterized, providing results that made it possible to describe and analyse its daylighting and insolation.

Since the behaviour of certain models and situations, such as diffuse daylight performance depending on the building's orientation, was known beforehand, it could be verified that the methodology proposed in this study provided coherent, valid results.

By analysing each calculation series based on the annual values for the metrics, it was possible to determine the performance and tendencies caused by the strategy being studied across its whole range of variation, and thereby characterize the model. This process of analysis incorporated the analysis criteria corresponding to each metric, so it was possible to identify those calculation models within each series which would not provide suitable daylighting and insolation.

Keeping the initial model as a reference, the relative weight of each model within the same series (that is to say, its proportionality factor) was also obtained.

The impact of each series on each metric was analysed transversely, identifying which strategies exerted the biggest and smallest influence on each metric and determining whether the influence was positive (i.e., it increased the initial reference value) or negative (i.e., it decreased the initial reference value).

The fact that the analysis was carried out considering the previously defined analysis criteria meant that the impact of each series could be evaluated against the minimum daylighting and insolation requirements.

Analysis of each series gave the prevailing trend of that series, while analysis of each metric gave each strategy's capacity to modify it. Global analysis of the results revealed a certain order of classification, reflecting the extent to which each parameter affected the space's daylight and solar exposure:

- Determinant strategy: size of opening
- Conditioning strategy: climate conditions, orientation and obstructions in the surrounding area
- Reducing strategies: transparency of openings and shading devices
- Explicative strategies: position, shape, segmentation and distribution of openings

In this research project, the impact of architectural strategies on daylight and solar exposure was analysed by fulfilling the following objectives:



## 5.2 Impacto de las estrategias arquitectónicas

Una vez definida la nueva metodología de cálculo, se ha diseñado un experimento donde se han considerado las principales estrategias arquitectónicas que tienen influencia sobre las condiciones de iluminación natural y de insolación del espacio.

Cada estrategia arquitectónica constituye una serie de cálculo. Para cada serie se definen además, las diferentes variaciones posibles para cubrir todo el rango. La aplicación de la metodología ha permitido caracterizar cada uno de los modelos de cálculo, proporcionando resultados que permiten describir y analizar las condiciones de iluminación natural y de insolación.

Conocidos de antemano el comportamiento de determinados modelos y determinadas situaciones, como la evolución de la componente difusa de la iluminación natural en función de la orientación, se ha podido verificar que la metodología propuesta en esta investigación proporciona resultados coherentes, otorgándole validez.

El análisis de cada serie de cálculo, a partir de los valores anuales de los indicadores, ha permitido determinar el comportamiento o la tendencia que provoca la estrategia estudiada en todo su rango de variación, lo cual ha permitido caracterizarlo. En este proceso de análisis se han incorporado los criterios de análisis de los indicadores, por lo que se ha detectado cuáles son los modelos de cálculo dentro de la serie que no proporcionarían unas adecuadas condiciones de iluminación natural y de insolación.

Además, manteniendo el modelo inicial como de referencia, se ha obtenido el peso relativo de cada uno de los modelos dentro de la misma serie, que constituyen los factores de proporcionalidad de cada modelo dentro de la serie.

Para analizar el impacto de cada una de las series sobre cada indicador se ha realizado un análisis transversal detectando cuáles son los parámetros con mayor o menor influencia sobre cada uno de los indicadores así como determinando si esta influencia era positiva, incrementando el valor, o negativa, disminuyendo el valor inicial.

Este análisis se ha realizado considerando los criterios de análisis definidos, de forma que se ha podido evaluar el impacto de cada serie respecto a los requisitos mínimos de iluminación y máximo de insolación.

Como resultado del análisis de cada serie, por tanto, se ha obtenido la tendencia de la misma, del análisis de cada indicador, se ha obtenido la capacidad de cada estrategia o parámetro para modificar dicho indicador, y del análisis global de los resultados, se ha constatado una cierta clasificación de los parámetros en función de cómo afectan a las condiciones de iluminación natural y de insolación del espacio:

- Parámetro determinante: Tamaño del hueco
- Parámetros condicionantes: Condiciones climáticas, orientación y elementos de obstrucción del entorno
- Parámetros reductores: Transparencia del hueco y dispositivos de protección solar
- Parámetros matizadores: Forma, posición, división y distribución del hueco

Para el análisis del impacto de los parámetros o estrategias arquitectónicas sobre las condiciones de iluminación natural e insolación en esta investigación se han cumplido los siguientes objetivos:

### 5.2.1 Definition and Analysis of Strategies

*The different architectural strategies associated with daylighting were studied and analysed using the new metrics and their evaluation criteria.*

Existing State-of-the-Art material referencing the architectural strategies that affect daylighting and insolation in interior spaces was examined and used to obtain a list of parameters classified according to their nature and margin for modification (i.e., outdoor conditions, imposed by the site location), parameters to do with the design of opening/s, and parameters to do with shading devices.

While acknowledging the existence of many more parameters, produced by more complex realities, 12 parameters were chosen, representing those deemed to be the most important. For each parameter, a series of variations were defined with regard to a reference model, the aim being to cover that parameter's entire range of possible variations.

Each variation generated its own calculation model, and the resulting 119 models were simulated in 3 different programs, producing 5 descriptive graphs expressing the daylighting and insolation levels for the model in question and 2 analytical graphs per model. The graphs and the corresponding analysis are presented in Annex B.

The annual values from each simulation model were used to analyse each series or architectural daylighting strategy. Trend curves corresponding to each metric were obtained for each strategy, and performance was analysed. For the most important metrics and for those which showed the greatest variation, the monthly evolution of several models was also analysed.

The result was the creation of a catalogue characterizing the light and heat effects of solar radiation entering through the opening and showing the trend curves of each strategy for each metric. These graphs are evaluated in the corresponding section.

Taking Global Daylight Sufficiency (DSg) and Excessive Solar Heat Gain (SHGe) as two of the most representative metrics, it was determined that:

1. With regard to the site, both metrics increase as the latitude, and with it the percentage of clear days, decreases.
2. With regard to the frontal angle of obstruction, neither of the two metrics is much affected by angles of less than 30°, and their annual value decreases as the frontal angle of obstruction increases. At an angle of about 50° or greater, the minimum illuminance requirement would not be met.
3. With regard to orientation, both metrics display parabolic behaviour. The curve is steeper for excessive solar heat gain, attaining a maximum value on south facing facades.
4. The values of both metrics increase with the size of the opening, until saturation level is reached.
5. A gradual reduction in the transparency of the glazing leads to a gradual decrease in the DSg metric and a lower solar factor for the glazing (depending on the product), leading to a decrease in the SHGe metric.

### 5.2.1 Definición y análisis de las estrategias

*Se han estudiado y analizado diferentes estrategias arquitectónicas relacionadas con la iluminación natural en base a los nuevos indicadores y sus criterios de evaluación.*

A partir de la elaboración del Estado del Arte sobre las estrategias arquitectónicas que afectan a las condiciones de iluminación natural, y también a la insolación, de los espacios interiores, se ha obtenido una relación de parámetros que ha sido clasificada en función su naturaleza y su grado de libertad, es decir, condiciones exteriores, impuestas por la localización, parámetros relativos a la definición del/de los hueco/s y parámetros relativos a los dispositivos de protección solar.

Siendo consciente de que existen muchos más parámetros, que resultan de realidades más complejas, se han escogido los 12 parámetros que se han considerado más relevantes. Por cada parámetro se ha definido una serie de variaciones respecto a un modelo de referencia tratando de cubrir todo el rango de variaciones posibles de dicho parámetro.

Constituyendo cada variación un modelo de cálculo, se han elaborado un total de 119 modelos, que se han simulado en 3 programas diferentes, dando lugar a 5 gráficas descriptivas de las condiciones de iluminación natural y de insolación de dicho modelo, y 2 gráficas analíticas por cada uno de ellos. Estas gráficas y el análisis correspondiente de las mismas se expone en en Anexo B.

Con los valores anuales de cada modelo de simulación se ha realizado el análisis de cada serie o estrategia arquitectónica de iluminación natural. Se han obtenido las curvas de tendencia de cada estrategia en función de cada indicador, analizando su comportamiento. Así también se ha analizado la evolución mensual de varios de sus modelos para los indicadores con mayor variación o más relevantes.

Como resultado se obtiene un catálogo con la caracterización del efecto lumínico y térmico de la radiación solar que entra a través del hueco y las curvas de tendencia de cada estrategia para cada indicador. La valoración de estas últimas se encuentra en su apartado correspondiente.

Atendiendo a los indicadores de suficiencia de iluminación natural global (DSg) e insolación excesiva (SHGe), como de los más representativos, se ha podido determinar que:

1. Para la localización ambos indicadores ascienden a medida que disminuye la latitud y con ella, el porcentaje de días despejados.
2. Para el ángulo de obstrucción frontal ambos indicadores apenas se ven afectados por ángulos menores de 30°, disminuyendo el valor anual a medida que aumenta el ángulo de obstrucción frontal. No se alcanzaría el requisito mínimo de iluminancia a partir de un ángulo de 50° aproximadamente.
3. Para la orientación ambos indicadores muestran un comportamiento parabólico, siendo de mayor pendiente para la insolación excesiva, con máximo en la orientación Sur.
4. A medida que aumenta el tamaño del hueco aumenta el valor de ambos indicadores, llegando a la saturación.
5. La reducción progresiva de la transparencia del vidrio conlleva la reducción progresiva del indicador DSg y un menor factor solar del vidrio, dependiendo del producto, lo que produce una reducción del indicador SHGe.

6. The position of the opening has no effect on solar gain, so the SHGe metric remains constant. Moving the opening upwards slightly improves the DSg metric, while placing it further down drastically reduces daylighting potential, since in the latter case most of the glazed surface is below the level of the workplane. Moving the opening to the left or right produces a slight reduction in comparison with the central position.
7. The shape coefficient causes hardly any variations in either of the two metrics: the SHGe metric remains constant, since the glazed area is unchanged, and the DSg decreases slightly with more vertical windows because part of the opening's surface area is below the level of the workplane.
8. Segmenting the opening has no effect on the SHGe metric, since the total glazed area is unchanged, but it does affect the DSg metric, in three different ways. If the window's head height remains unchanged, there is hardly any change in this metric; if the window width remains unchanged, the metric decreases, especially when part of the opening's surface area is below the level of the workplane. Segmenting the opening as a grid produces a more constant reduction in the metric across all the variations proposed.
9. When the openings are distributed over several facades, both metrics display fluctuations of approximately 10% with regard to the reference model.
10. Overhangs cause a gradual decrease in both metrics, the steepest curve corresponding to the SHGe metric.
11. Vertical fins in a south-facing reference model hardly caused either of the two metrics to change.
12. Fixed horizontal louvers had an effect similar to that caused by overhangs, but with a steeper curve, especially for the DSg metric.
13. Fixed vertical louvers also had a similar effect, producing approximately the same curves.
14. Fixed louver trellises also caused the metrics to decrease, producing a much steeper curve in both of them.

### **5.2.2 The Impact on Daylighting and Insolation**

*The impact of each strategy on the daylighting and insolation in a reference space was determined.*

Once the behaviour curves corresponding to each parameter had been obtained for each metric from the annual values of each model in each series, the relative weight of each model within its series was obtained with regard to the reference model.

The value of this relative weight, or proportionality factor, positioned each model in the series in relation to the reference model in such a manner that, given the annual value for each of the metrics in the reference model, it was possible to determine the annual value for each metric in any of the other models being studied.

However, the determination of the relative weight of each model in the series did not provide a global view of how architectural strategies affect daylighting and insolation,

6. La posición del hueco no afecta a las ganancias solares, por lo que el indicador SHGe permanece constante. La traslación a posiciones superiores mejora ligeramente el indicador DSg mientras que a posiciones inferiores reduce drásticamente el potencial de iluminación natural, debido a que la mayor parte de la superficie acristalada se encuentra por debajo del plano de trabajo. La traslación a la derecha o izquierda produce una ligera reducción respecto a la posición central.
7. El coeficiente de forma apenas provoca variaciones en ambos indicadores: el indicador SHGe permanece constante, ya que se mantiene la superficie de hueco, y el indicador DSg se reduce ligeramente en las ventanas más verticales, debido a que parte de la superficie de hueco se encuentra por debajo del plano de trabajo.
8. La división del hueco no afecta al indicador SHGe ya que se mantiene la superficie total acristalada, sin embargo, sí afecta al indicador DSg de tres formas distintas. Si se mantiene la altura de la ventana apenas se modifica este indicador; si se mantiene la anchura, se reduce este indicador, especialmente cuando parte de la superficie de hueco se encuentra por debajo del plano de trabajo. La división en matriz provoca una reducción más constante a lo largo de las variaciones propuestas.
9. Para la distribución del hueco en varias fachadas ambos indicadores muestran oscilaciones de aproximadamente el 10% respecto al modelo de referencia.
10. El voladizo provoca una reducción progresiva de ambos indicadores, siendo de mayor pendiente para el indicador SHGe.
11. Los salientes laterales en un modelo de referencia orientado al Sur, apenas provoca modificaciones en ambos indicadores.
12. Las lamas fijas horizontales provocan un comportamiento similar al voladizo, pero con una pendiente más pronunciada, especialmente en el indicador DSg.
13. Las lamas fijas verticales también presentan un comportamiento similar, con aproximadamente las mismas pendientes.
14. Las celosías de lamas fijas también presentan un comportamiento reductor con una pendiente mucho mayor en ambos indicadores.

## 5.2.2 Impacto sobre la iluminación natural y la insolación

### *Determinación del impacto de cada estrategia sobre la Iluminación Natural y la Insolación de un espacio de referencia.*

Una vez obtenidas las curvas de comportamiento de cada parámetro según cada indicador en función de los valores anuales de cada uno de los modelos que componen cada serie, se ha obtenido el peso relativo de cada modelo dentro de su serie respecto al modelo de referencia.

Este valor de peso relativo o factores de proporcionalidad posicionan a cada uno de los modelos dentro de la serie respecto al modelo de referencia, de forma que, sabiendo el valor anual de cada uno de los indicadores del modelo de referencia se puede saber el valor anual para cada uno de los indicadores de cualquier otro modelo de los estudiados.

Sin embargo, la determinación del peso relativo de cada modelo dentro de la serie no permite la obtención de una visión global del impacto de las estrategias arquitectónicas sobre las condiciones de iluminación natural y de insolación.

So, to determine how each strategy impacts each of the new metrics proposed in the study, a transverse analysis was performed.

In general, no clear indication was obtained regarding which strategy has the biggest impact on each metric, because the variations are quite similar in nearly all the metrics. Likewise, it was not possible to determine which metric is the most susceptible to modification.

Regarding illuminance ranges, however, it was found that the ranges with least variation were those at the upper and lower extremes, the only exceptions being in specific circumstances such as openings with excessive surface areas, which have a big effect on illuminances greater than 3000 lux, and opening with surfaces below the level of the workplane, which increase workplane coverage with illuminances lower than 100 lux.

Within the three middle ranges, which correspond to levels of illuminance sufficient for most visual tasks, the range with the greatest variation was that of 500-3000 lux, followed by those of 300-500 lux and 100-300 lux. This gave rise to the hypothesis that this illuminance range covers such a wide spectrum that it is affected by all architectural strategies, with either reductions in coverage in the excessive light range or increases in light potential through the absorption of points previously found in lower ranges.

In any case, the distribution of illuminance on the workplane would have to be studied further to determine how it evolves in time and reveal which points in a range move upwards or downwards towards the adjacent range. A time analysis of the workplane for each 100 lux would provide a more accurate idea of illuminance movement over the plane, but would not offer any spatial information relating to that movement.

A global analysis of the results, carried out examining standard deviation values, gives no clear, ordered list of ways in which architectural daylighting strategies affect interior conditions, partly because the most influential strategies vary from one metric to another.

Furthermore, on several occasions it was only discrete models within a series that provided high standard deviation values, the median values being considerably lower. Since the distribution of values in each series was not uniform, the results obtained cannot therefore show the true weight of each series on each metric, or on daylighting and insolation in general.

Despite this problem, it was still possible to classify the different strategies as shown below, according to their impact – positive or negative – and their margin for modification in the design process for a new building.

- Determinant strategy: size of opening.
- Conditioning strategies: climate conditions, orientation and obstructions in the surrounding area.
- Reducing strategies: transparency of openings, overhangs, vertical fins and fixed louvers.
- Explicative strategies: position, shape, segmentation and distribution of openings.

The size of the opening is undoubtedly the parameter which determines a space's daylighting and insolation potential. But it also serves to define the space's lighting properties. That is to say, the size defined for the opening establishes the maximum daylight potential, a value that other strategies can only reduce or adjust.

Es por ello que se realiza un análisis transversal para determinar el impacto de cada estrategia sobre cada uno de los nuevos indicadores propuestos en este trabajo.

En general no se obtiene una relación clara sobre cuál es la estrategia que tiene el mayor impacto por cada uno de los indicadores ya que las variaciones en casi todos los indicadores son bastante similares, por lo que tampoco se puede determinar cuál es el indicador más susceptible a ser modificado.

Sin embargo, en lo que respecta a los rangos de iluminación se obtiene que los rangos extremos son los que tienen una menor variación salvo por casos puntuales como un exceso de superficie de hueco que provoca un gran impacto en las iluminancias mayores de 3000 lux, o la presencia de superficie de hueco por debajo del plano de trabajo, que incrementa la cobertura del plano de trabajo con iluminancias menores de 100 lux.

Dentro de los tres rangos centrales, de iluminancia útil para el desarrollo de la mayoría de las tareas visuales, se obtiene que el rango de mayor variación es el de 500-3000 lux, seguido por 300-500 lux y 100-300 lux. La hipótesis que se baraja en este aspecto es que este rango de iluminancias, por su amplitud, se ve afectado por todas las estrategias arquitectónicas, ya sea por la reducción de la cobertura en el rango de iluminación excesiva, como que se aumente el potencial de iluminación absorbiendo puntos que antes se encontraban en rangos inferiores.

En cualquier caso, habría que analizar hora a hora la distribución de iluminancias en el plano de trabajo para determinar su evolución y conocer qué puntos de un rango se mueven hacia su inmediato superior o inferior. Si se realiza un análisis temporal del plano de trabajo por cada 100 lux, se tendría una más afinada aproximación al movimiento de iluminancias en el plano de trabajo, pero tampoco se obtendría información espacial sobre la evolución de las mismas.

Del análisis global de los resultados, mediante el análisis de la desviación estándar, no se obtiene una relación clara y ordenada del impacto de las estrategias arquitectónicas de iluminación natural sobre las condiciones interiores, entre otras porque para cada indicador la estrategia más influyente varía.

Además, en varias ocasiones son sólo modelos puntuales dentro de una serie los que proporcionan los mayores valores de la desviación estándar, siendo la mediana de los valores bastante menor. Por tanto, al no tener una distribución homogénea de valores en cada serie, los resultados no llegan a mostrar en verdadero peso de cada serie sobre cada indicador, ni sobre las condiciones de iluminación natural y de insolación en general.

Pese a esta problemática sí se han podido clasificar las diferentes estrategias o parámetros en función de su impacto, positivo o negativo, y el grado de libertad que tienen en el proceso de diseño de un edificio. Que viene a ser la siguiente:

- Parámetro determinante: Tamaño del hueco.
- Parámetros condicionantes: Condiciones climáticas, Orientación y Obstrucción del entorno.
- Parámetros reductores: Transparencia del hueco, Voladizo, Saliente Lateral y Dispositivos de Lamas Fijas.
- Parámetros matizadores: Forma, Posición, División y Distribución del hueco.

Sin lugar a dudas, el tamaño del hueco es el parámetro que determina el potencial de iluminación natural y de insolación del espacio. Además este parámetro tiene la facultad de definir las características luminotécnicas del espacio, es decir, mediante la definición del tamaño del

Also, if an effective reducing strategy is implemented once a size has been defined for the opening, the lowest workplane coverage in each illuminance range or the coverage value that remains constant will be representative of the space being studied.

However, to definition the size of the opening – and thus establish a space’s daylighting and insolation potential – three parameters inherent to the project’ location must necessarily be considered:

Climate conditions, the orientation of the glazed façade and the presence of obstructions in the surrounding area. These three parameters constitute the conditioning strategies for the space’s daylighting and solar exposure potential because they are factors that are imposed by the building’s surrounding environment and cannot be altered by the architect.

Another group of strategies, which can be defined as measures of reduction, are characterised by the ease with which they can implemented both in new building design and in the refurbishment of existing buildings. They include the transparency of the glazing employed and the incorporation of shading elements like overhangs, vertical fins and fixed louver devices.

It should be remembered that these are all measures which reduce the potential daylighting and insolation potential in circumstances of maximum transparency and the absence of shading devices, and that they should therefore be used carefully.

The last group of strategies are the ones known as explicative strategies. These strategies, which have much less influence on almost all of the metrics, include those architectural strategies to do with the opening’s shape, its position in the wall, the way its surface if segmented into smaller openings and the distribution of glazed surface on different walls.

Although they have almost no effect on the metrics, they are nevertheless elements which have to be defined at the design stage of a new building and are difficult to alter in a refurbishment project. In quantitative terms, they do shape daylighting and insolation, but their effect on interior lighting is mainly qualitative and perceptual.

### **5.3 Application in Architectural Design**

---

*The impact, or proportionality, factor of each strategy or parameter was applied to the reference model to predetermine the daylighting and insolation conditions in a complex reality. This made it possible to establish sufficient margin of variation and adopt different strategies in such a manner as to balance a suitable level of daylight in the space with the solar gain received there.*

The final objective was to show how the results obtained could be applied practically to good benefit either in the initial phases of architectural design or in refurbishment projects. To this end, a process was defined for incorporating the impact of each strategy into the reference model in order to describe the daylighting and insolation condition of a reality made more complex by the combination of the different parameters.

A recently built residential building was chosen and values were determined for the conditioning strategies that could be used to determine the optimal size of the openings to be designed.



huevo, se establece el máximo potencial de iluminación natural, pudiendo sólo ser reducido o matizado mediante otras estrategias.

Por otro lado, definido el tamaño del huevo, si se aplica alguna estrategia reductora, en su máxima expresión se obtiene que la menor cobertura en cada uno de los rangos de iluminancia o aquella que permanece constante representan características propias del espacio de estudio.

Sin embargo, la definición del tamaño del huevo, y con ello del potencial de iluminación natural y de insolación del espacio, depende de tres parámetros inherentes a la localización del proyecto:

Las condiciones climáticas, la orientación de la fachada acristalada y la presencia de elementos de obstrucción en el entorno. Estos tres parámetros constituyen las estrategias o parámetros condicionantes del potencial de iluminación natural e insolación del espacio, ya que son cuestiones no modificables por el proyectista, sino que vienen sobrevenidas por las condiciones de contorno del edificio.

Se distingue también otro grupo de estrategias que se definen como medidas reductoras, que además tienen la propiedad de poder ser fácilmente ejecutadas tanto en el proyecto de un nuevo edificio como en la rehabilitación de un edificio existente. Éstas son la transparencia del vidrio y la incorporación de elementos de protección solar como los voladizos, los salientes laterales y los dispositivos de lamas fijas.

Sin embargo no se debe olvidar que todas son medidas que reducen el potencial de iluminación natural y de insolación respecto a una situación de máxima transparencia y sin presencia de dispositivos de protección solar, y que deben ser utilizadas con precaución.

El último grupo de parámetros, con la menor influencia en casi todos los indicadores, son las denominadas estrategias matizadoras. Éstas conforman aquellas estrategias arquitectónicas relativas a la forma del huevo, su posición dentro del paramento, la división de la superficie en diferentes huecos o la distribución de la superficie de huevo en varios paramentos.

Estas estrategias apenas reportan modificaciones sobre los indicadores, pero son elementos que se deben definir en el proyecto arquitectónico de un nuevo edificio, siendo difícilmente modificables en una operación de rehabilitación. Estas estrategias si bien matizan cuantitativamente las condiciones de iluminación natural y de insolación, son elementos cuyo efecto principalmente es cualitativo y perceptual de la iluminación de un espacio.

### **5.3 Aplicación al diseño arquitectónico**

*Se ha aplicado el factor de impacto o proporcionalidad de cada estrategia o parámetro sobre el modelo de referencia para predeterminar las condiciones de iluminación natural y de insolación de una realidad compleja que permita establecer el margen de variación y aplicación de las diferentes estrategias de forma que se asegure una adecuada iluminación natural del espacio en equilibrio con las ganancias solares recibidas.*

Con el objetivo último de proporcionar una aplicación práctica de los resultados obtenidos, destinado a ayudar en las primeras fases del proyecto arquitectónico o bien en los proyectos de rehabilitación, se ha diseñado el proceso de aplicación del impacto de cada estrategia sobre el modelo de referencia de forma que se describan las condiciones de iluminación natural y de insolación de una realidad más compleja, resultado de la suma de los diferentes parámetros. Para ello se ha escogido un edificio residencial de reciente construcción y se ha determinado el valor de las estrategias condicionantes para poder determinar el tamaño de huevo que debiera diseñarse.

Taking into account the known values for the site location, the orientation of the glazed facades and the frontal angle of obstruction for each floor in the building and for each possible orientation, the corresponding proportionality factors were applied to the reference model to profile the different design stages.

At each step, the modified model's daylighting and insolation parameters were simulated and the methodology proposed in this study was used to obtain the values of the new metrics.

When the values obtained by applying the proportionality factors were compared with those obtained from the simulation, it was found that the proportionality factors can only be applied in the first stage: that is to say, the stage in which the factors corresponding to the project location are applied.

In all the other stages, it was found that, although, qualitatively, the behaviour of their curves remained relatively similar, the absolute values differed considerably, sometimes producing incoherent results.

The results obtained by means of the application of the methodology of calculation developed in this research, nevertheless, provide a more real approximation to the description of the conditions of daylighting and insolation of the space.

By performing a simple geometric simulation of design conditioning elements to do with site location, the orientation of glazed facades and obstructions in the surrounding area, it is possible to predetermine an opening surface area which will ensure optimal daylighting and insolation and which can be adjusted, using knowledge of the trend curves for each strategy, to produce the range of illuminances that best match the visual tasks most likely to be performed in a given space.

At the same time, information can be obtained about the space's insolation, an issue which needs to be incorporated into the space's thermal balance to determine its maximum desirable solar gain in summer and minimum desirable solar gain in winter.

Therefore, one has developed a methodology of calculation and a few indicators of daylighting and insolation that can help in the first phases of design, advancing thus in the development of a tool that allows the design of the conditions of natural lighting as well as to orientate the architects at the moment of defining the fronts of their buildings.

Conocido el valor de la localización, de la orientación de las fachadas acristaladas y del ángulo de obstrucción frontal para cada planta del edificio en función de cada orientación, se ha procedido a aplicar los factores de proporcionalidad correspondientes sobre el modelo de referencia para alcanzar los diferentes estadios del proyecto.

Además, por cada paso se ha realizado la simulación de las condiciones de iluminación natural y de insolación del modelo modificado y se ha aplicado la metodología propuesta en esta investigación para obtener los valores de los nuevos indicadores.

La comparación entre los valores resultantes de la aplicación de los factores de proporcionalidad y de la simulación ha mostrado que sólo se pueden aplicar los factores de proporcionalidad en el primer estadio, es decir, el paso de aplicar los factores correspondientes a la localización del proyecto.

En todos los demás estadios se comprueba que si bien la tendencia general de los valores se mantiene, con cierta similitud, los valores absolutos difieren, y a veces proporcionan resultados no coherentes.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología de cálculo desarrollada en esta investigación, no obstante, proporcionan una aproximación más real a la descripción de las condiciones de iluminación natural y de insolación del espacio.

De este modo, mediante la simulación de una geometría sencilla de las condiciones del proyecto, relativas a la localización, la orientación de las fachadas acristaladas y las obstrucciones del entorno, es posible realizar un predimensionado de la superficie de hueco que asegure una adecuada iluminación natural e insolación, y que pueda ser matizada para fomentar el rango de iluminancias que sean más adecuadas para el desarrollo de las tareas visuales que se desarrollarán con mayor probabilidad en dicho espacio, mediante el conocimiento de las curvas de tendencia de cada estrategia.

Al mismo tiempo también se proporciona información sobre la insolación del espacio, cuestión que debe equilibrarse en el balance térmico del espacio para determinar cuál es la máxima insolación que debe recibir el espacio en verano, y la mínima insolación que debe recibir en condiciones de invierno.

Por tanto, se ha desarrollado una metodología de cálculo y unos indicadores de iluminación natural y de insolación que pueden ayudar en las primeras fases de diseño, avanzando de este modo en el desarrollo de una herramienta que permita el diseño de las condiciones de iluminación natural así como orientar a los arquitectos a la hora de definir las fachadas de sus edificios.



## Epílogo

El gran número de casos simulados han dado lugar a una gran base de datos de valores de *Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural* así como de insolación, que describen la variación temporal de los valores obtenidos en el plano de trabajo a lo largo de un año descrito en el archivo climático correspondiente a la localización de estudio.

El análisis paramétrico de cada uno de los elementos que determina las condiciones de iluminación natural de un espacio permite establecer ciertas curvas de tendencia caracterizando de este modo dicho elemento arquitectónico.

Sin embargo, la cantidad y cualidad de luz natural en el espacio se debe a la interacción de todas las variables que intervienen, por lo que es necesario conocer el peso relativo de cada uno de estos elementos en las condiciones de iluminación natural. En un primer intento de predeterminación de las condiciones de iluminación natural e insolación mediante la aplicación de los factores de proporcionalidad obtenidos para cada uno de los parámetros de estudio a un modelo de geometría sencilla de referencia ha mostrado que el efecto de éstos depende de la confluencia simultánea de dichos parámetros.

Para ello se realizará en un futuro variaciones de 2º orden, es decir la obtención de resultados al modificar dos de los parámetros considerados. De esta forma se obtendrá cuál es la curva de tendencia dominante de forma que permita jerarquizar con mayor precisión la influencia de cada uno de los elementos considerados.

Con estos factores de peso se avanzará en la creación una herramienta de análisis que permita, de forma cuantitativa, orientar al equipo de trabajo durante el proceso arquitectónico, especialmente en las primeras fases, para la toma de decisiones de cuestiones que son muy difícilmente cambiables no sólo cuando el edificio esté construido, sino en fase de diseño más avanzadas.

Además quedan pendientes otras estrategias o parámetros no estudiados como el estudio de otras características geométricas del modelo, las características interiores del espacio, las propiedades ópticas de los elementos de protección solar y de los obstáculos del entorno o las dimensiones de tamaño de hueco más normalizadas.

El campo de las propiedades ópticas también abre paso a la realización de una base de datos con las características ópticas de los materiales de construcción más allá de su coeficiente de reflexión en función de su color, considerando también su rugosidad, entre otros.

Por otro lado, la imposibilidad de obtener una distribución de las ganancias solares a través de las ventanas en los puntos del plano de trabajo abre otra línea de trabajo, desde el campo de la computación como de estudio de campo, que permita una visión integral del efecto de la radiación solar que entra a través de los huecos.

Se abren, por tanto, nuevas líneas de investigación que ayuden a considerar el ambiente luminoso en conjunción con su incidencia térmica para un diseño de los edificios más sostenible, de forma que se reduzca desde el acondicionamiento lumínico y térmico el consumo energético de los edificios.



## Figuras

Portada: Casa Guerrero. Fernando Alda.....	portada
Figura 1: Plano de Mileto [24]. .....	32
Figura 2: Los patios en las casas griegas y romanas actúan como espacios servidores de iluminación natural y soleamiento [21]. .....	32
Figura 3: Atrium e Impluvium con columnas. Casa del Menandro (Pompeya, Roma) .....	32
Figura 4: <i>Marco Vitruvio y De Architectura</i> .....	33
Figura 5: <i>Regla de Oro de Vitruvio</i> [27]. Determinación de la línea sin cielo. ....	33
Figura 6: Sala octogonal. Domus Aurea (Roma, Italia), 68 d.C. [28]. .....	33
Figura 7: Sección tipo de la basílica paleocristiana. ....	34
Figura 8: Basílica de Santa Sabina (Roma, Italia), s.V. ....	34
Figura 9: Iglesia del Monasterio de San Martín de Tours (Frómista, Palencia, España), s.XI. ....	34
Figura 10: Iglesia abacial de Sainte-Foy de Conques (Conques, Francia), s. XI. ....	34
Figura 11: Cripta del Monasterio de Germerode (Meissner, Hesse, Alemania), s.XII. ....	35
Figura 12: Catedral de Durham (Durham, Inglaterra), s. XI. ....	35
Figura 13: Abadía de Saint-Denis (Paris, Francia), s. XII-XIII. ....	35
Figura 14: Diferentes entradas de luz. Catedral de Köln (Colonia, Alemania), s. XIII-XIX. ....	35
Figura 15: Hamman el Bañuelo (Granada, España), s. XI.....	36
Figura 16: Celosía del Palacio de Comares. Alhambra de Granada (Granada, España), s. XI-XVI. ....	36
Figura 17: Iglesia de Santa Sofía (Estambul, Turquía), s. IV-IV. ....	36
Figura 18: Iglesia de San Lorenzo (Florencia, Italia), <i>F. Brunelleschi</i> 1418-1470. ....	37
Figura 19: Iglesia de Santa María della Consolazione (Todi, Italia), <i>D. Bramante</i> 1508-1607. ....	37
Figura 20: Intersticio de la doble estructura de la Cúpula de Santa María del Fiore (Florencia, Italia), <i>F. Brunelleschi</i> 1420-1436 .....	37
Figura 21: Interior de la Iglesia de San Pedro del Vaticano (Roma, Italia), <i>D. Bramante, M.A. Buonarroti</i> 1678-1684. ....	37
Figura 22: Grada exterior. Iglesia del Gesù (Roma, Italia), <i>J. Vignola</i> 1568-1571. ....	38
Figura 23: Énfasis del Altar mayor dejando las capillas laterales en penumbra. Iglesia del Gesù (Roma, Italia), <i>J. Vignola</i> 1568-1571.....	38
Figura 24: Distribución de las ventanas laterales de la nave y el óculo sobre la entrada. Iglesia del Gesù (Roma, Italia), <i>J. Vignola</i> 1568-1571.....	39
Figura 25: Óculo de la Iglesia del Gesù (Roma, Italia), <i>J. Vignola</i> 1568-1571. ....	39

Figura 26: Tumba de Alejandro VII. San Pedro del Vaticano (Roma, Italia), <i>G.L. Bernini</i> 1678. ....	39
Figura 27: Lucernario oculto. Éxtasis de Santa Teresa. Capilla Cornaro, Iglesia Santa María de la Victoria (Roma, Italia), <i>G.L. Bernini</i> 1647-1652. ....	39
Figura 28: Rotonda Sant'Andrea al Quirinale (Roma, Italia), <i>G.L. Bernini</i> 1658-1670. ....	40
Figura 29: Separación e iluminación del altar mayor. Rotonda Sant'Andrea al Quirinale (Roma, Italia), <i>G.L. Bernini</i> 1658-1670. ....	40
Figura 30: Vista interior del conducto de luz del altar. Rotonda Sant'Andrea al Quirinale (Roma, Italia), <i>G.L. Bernini</i> 1658-1670. ....	40
Figura 31: Sant'Ivo alla Sapienza (Roma, Italia), <i>F. Borromini</i> 1642-1660. ....	41
Figura 32: Galería de los espejos. Palacio de Versalles (París, Francia), <i>Jules Hardouin Mansart</i> 1678-1684. ....	41
Figura 33: Proyecto para la Biblioteca de los Reyes, <i>E-L. Boullée</i> 1785. ....	42
Figura 34: Museo del Prado (Madrid, España), <i>J. Villanueva</i> 1785-1818. ....	42
Figura 35: Dulwich Picture Gallery (Londres, UK), <i>Sir John Soane</i> 1817. ....	42
Figura 36: Cúpula balaustrada de la Cripta Casa-Museo Soane (Londres, UK), <i>Sir John Soane</i> 1837. ....	42
Figura 37: Galería de Víctor Manuel II (Milán, Italia), <i>G. Mengoni</i> 1865. ....	43
Figura 38: Edificios industriales iluminados naturalmente con luz cenital y clerestoria. ....	43
Figura 39: Lámpara incandescente con filamento de carbón. ....	43
Figura 40: Iluminación artificial de nave industrial. ....	44
Figura 41: Barrios obreros entorno a los centros industriales. ....	44
Figura 42: Esquema de cumplimiento de la servidumbre de luz natural [46]. ....	44
Figura 43: Luxómetro de Trotter (1911) [47]. ....	44
Figura 44: Prevalencia de la luz natural en talleres. ....	45
Figura 45: Crecimiento de edificios en altura debido a las nuevas tecnologías. Madison Square Parks, Nueva York, USA (1912). ....	45
Figura 46: Iluminación de oficina, alrededor de 1910 [52]. ....	45
Figura 47: Casa Batlló (Barcelona, España), <i>Gaudí</i> 1904-1906. ....	46
Figura 48: Unity Temple (Illinois, USA), <i>F.L. Wright</i> 1905-1908. ....	46
Figura 49: Unity Temple (Illinois, USA), <i>F.L. Wright</i> 1905-1908. ....	46
Figura 50: 'La lección de Roma' de L'esprit nouveau n.14, <i>Le Corbusier</i> 1922-23. ....	47
Figura 51: Le ville contemporaine, Croquis de <i>Le Corbusier</i> 1922. ....	47
Figura 52: Cálculo de la componente de cielo utilizando el método del <i>Diagrama de Waldram</i> . ....	47
Figura 53: Estudio comparativo de los niveles de iluminación proporcionados por ventanas verticales u horizontal, <i>Le Corbusier</i> [58]. ....	48



Figura 54: Biblioteca de Viipuri (Vyborg, Finlandia), <i>Alvar Aalto</i> 1927-1935. ....	48
Figura 55: Imagen de la película ‘ <i>El apartamento</i> ’ (1960). ....	49
Figura 56: Estudio del movimiento aparente del Sol para la Unité d’habitation (Marsella, Francia), <i>Le Corbusier</i> 1946. ....	49
Figura 57: Interior del edificio Seagram (Nueva York, USA), <i>Mies van der Rohe</i> 1954-1958. ....	49
Figura 58: Control de la luz natural en la mediante el levantamiento de un muro que separa la biblioteca de la sala de estar (Tacubaya, México), <i>Luis Barragán</i> 1948. ....	49
Figura 59: <i>Distribución de luminancias del Cielo Nublado Estándar CIE</i> [62]. ....	50
Figura 60: Esquema sobre la consideración del soleamiento en latitudes altas, <i>R. Erskine</i> 1959. ....	50
Figura 61: Interior de la Iglesia Notre Dame du Haut (Ronchamp, Francia), <i>Le Corbusier</i> 1950-1955. ....	51
Figura 62: Las 24 horas solares. Esquema sobre la importancia del control solar, <i>Le Corbusier</i> 1954. ....	51
Figura 63: Reflectores asimétricos. Museo Kunsten (Aalborg, Dinamarca), <i>Alvar Aalto</i> 1958-1972. ....	52
Figura 64: Interior del Museo Kunsten (Aalborg, Dinamarca), <i>Alvar Aalto</i> 1958-1972. ....	52
Figura 65: Casa de Té Boa Nova (Leça da Palmeira, Portugal), <i>Álvaro Siza</i> 1958-1962. ....	52
Figura 66: Detalle de linterna en Casa de Té Boa Nova (Leça da Palmeira, Portugal), <i>Álvaro Siza</i> 1958-1962. ....	52
Figura 67: Lucernarios del Centro Británico de Arte. Universidad de Yale (New Haven, Connecticut, USA), <i>Louis I. Kahn</i> 1965-1974. ....	53
Figura 68: Estructura base de lucernario aplicada para iluminar y modular la galería de la 4ª planta. Centro Británico de Arte (New Haven, Connecticut, USA), <i>Louis I. Kahn</i> 1965-1974. ....	53
Figura 69: División de la estructura base para iluminar el hueco de escaleras. Centro Británico de Arte (New Haven, Connecticut, USA), <i>Louis I. Kahn</i> 1965-1974. ....	53
Figura 70: Ejemplo de aplicación del <i>método de diseño gráfico de luz natural (GDDM)</i> [62]. ....	54
Figura 71: Esquema conceptual del método de la <i>Radiosidad</i> [68]. ....	54
Figura 72: Esquema conceptual del método <i>Backward Raytracing</i> [68]. ....	54
Figura 73: Concepto de <i>Vector Iluminación Natural</i> [73]. ....	55
Figura 74: Concepto de <i>Coeficientes de Luz Natural</i> [77]. ....	55
Figura 75: Iglesia de la Luz (Osaka, Japón), <i>Tadao Ando</i> 1989. ....	55
Figura 76: Colección Menil (Houston, USA), <i>Renzo Piano</i> 1982-1986 [78]. ....	56
Figura 77: Galería de Arte Goetz (Berlín, Alemania), <i>Herzog &amp; de Meuron</i> 1986-1987. ....	56

Figura 78: Instituto del Mundo Árabe (París, Francia), <i>Jean Nouvel</i> 1981-1987 [79].	56
Figura 79: Termas de Vals (Graubunden Canton, Suiza), <i>Peter Zumthor</i> 1993-1996.	57
Figura 80: Interior del edificio de Caja Granada (Granada, España), <i>A. Campo Baeza</i> 2001 [81].	57
Figura 81: <i>Distribución de luminancias</i> de los 15 modelos de cielo contenidos en el <i>Modelo de Cielo General Estándar CIE</i> [83].	58
Figura 82: Esquema conceptual de los programas de <i>Simulación Dinámica de Iluminación Natural</i> , como <i>DAYSIM</i> [84].	58
Figura 83: <i>Indicadores dinámicos de Iluminación Natural</i> : Distribución sobre el plano de trabajo [85].	58
Figura 84: Expresión gráfica del análisis térmico de un edificio. Salida de datos de <i>DesignBuilder</i> [86].	58
Figura 85: Luxómetro de Trotter (1911) [47].	61
Figura 86: Espectro electromagnético de la radiación solar.	61
Figura 87: <i>Distribución de luminancias</i> de los 15 modelos contenidos en el <i>Cielo General Estándar CIE</i> [83].	62
Figura 88: Concepto de <i>Factor de Iluminación Natural</i> .	63
Figura 89: Representación de los <i>Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural</i> [17].	63
Figura 90: Desarrollo temporal de los modelos, métodos e indicadores.	65
Figura 91: Distribución espectral de la radiación solar extraterrestre y al nivel del mar (curva inferior).	67
Figura 92: Distribución porcentual de la radiación solar en las regiones del espectro electromagnético.	67
Figura 93: Ejemplos de variación de <i>iluminancia</i> en la bóveda celeste bajo diferentes condiciones de cielo [105].	68
Figura 94: Componentes de la iluminación natural [95].	69
Figura 95: <i>Cielo Nublado Estándar CIE</i> [62].	70
Figura 96: <i>Daylight protractor</i> [62].	70
Figura 97: Concepto de <i>Coeficientes de Luz Natural</i> [110].	71
Figura 98: <i>Distribución de luminancias</i> del <i>Cielo Nublado Estándar CIE</i> [62] [105].	72
Figura 99: Ángulos que definen la posición del Sol y un elemento de cielo [87].	77
Figura 100: Diferencia entre el modelo de cielo «tradicional» y el elaborado por Perez [87].	78
Figura 101: <i>Distribución de luminancias</i> de los 15 modelos incluidos en el <i>Cielo General Estándar CIE</i> [83].	79
Figura 102: Concepto de <i>Factor de iluminación natural</i> .	80
Figura 103: Componentes del <i>Factor de Iluminación Natural</i> [114].	80

Figura 104: Representación gráfica del <i>Factor de Iluminación Natural</i> mediante isolíneas [50].	81
Figura 105: <i>Altitud y Azimut</i> solar [3].	82
Figura 106: Construcción de las <i>cartas solares</i>	82
Figura 107: Principales tipos de proyecciones. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Proyección esférica, equidistante, estereográfica, según el <i>método BRE</i> , ortográfica y según el <i>método de Waldram</i> , obtenidas con el programa <i>Ecotect</i> [105].	83
Figura 108: Análisis de asoleo de un punto en el interior de un espacio utilizando la proyección estereográfica.	83
Figura 109: Análisis del potencial de exposición solar de un emplazamiento [105].	84
Figura 110: Cálculo del potencial de Soleamiento en un punto para Londres. <i>Método APSH</i> .	84
Figura 111: Componentes de la iluminancia global. J. Mardaljevic [1].	85
Figura 112: Simulación dinámica frente al cálculo del <i>Factor de Iluminación Natural</i> . J. Mardaljevic [96].	86
Figura 113: Fundamentos de los <i>Coefficientes de Luz Natural</i> [110].	87
Figura 114: Mapa temporal con los valores de iluminancia (lux) en un punto a lo largo del año [84].	88
Figura 115: Iluminancias en un punto. Concepto de <i>Autonomía de Luz Natural</i> . P.M. Esquivias	90
Figura 116: Iluminancias en un punto. Concepto de <i>Iluminancia Natural Útil</i> . P.M. Esquivias.	92
Figura 117: Transferencia de calor a través de una ventana [69].	95
Figura 118: Radiación solar sobre una ventana: transferencias [69].	96
Figura 119: Mecanismos de transferencia de calor en un elemento no opaco.	97
Figura 120: Esquema de un programa de simulación de luz natural [84].	102
Figura 121: <i>Backward Raytracing</i> [68].	103
Figura 122: <i>Radiosidad</i> [68].	104
Figura 123: Los procesos del <i>Método del Balance Térmico</i> representado como una red nodal [55].	108
Figura 124: Visión general del <i>Método de las Series Temporales Radiantes</i> [135].	109
Figura 125: Carteles acreditando su derecho a la luz en Londres.	115
Figura 126: <i>Regla de Oro</i> de Vitruvio [27].	119
Figura 127: Explicación gráfica de la <i>regla de la línea de 25°</i> [27].	120
Figura 128: Limitación de las sombras propias mediante la <i>regla de los 45°</i> [228].	121

Figura 129: (a) relación geométrica entre el ángulo de cielo y el ángulo de obstrucción; (b) definición de la <i>línea sin cielo</i> [225].	121
Figura 130: Determinación de la reducción de la superficie iluminada debido a la presencia de obstrucciones [235].	129
Figura 131: <i>Superficie mínima de ventana</i> expresada en porcentaje respecto a superficie de suelo [238].	132
Figura 132: <i>Superficie máxima de ventana</i> en función del <i>Factor Solar</i> [238].	132
Figura 133: <i>Regla de oro de la línea sin cielo</i> como determinante del paisaje urbano [230].	139
Figura 134: Casos en los que se debe considerar el aporte de luz natural para la regulación de la iluminación artificial en el ' <i>Documento Básico HE3</i> ' [241].	145
Figura 135: Diseño de Iluminación Natural de los edificios. Estrategias [71].	149
Figura 136: <i>Curva acumulativa de iluminancia horizontal exterior</i> global y difusa para Sevilla. <i>P.M. Esquivias</i> .	150
Figura 137: Influencia del entorno urbano y la forma construida en el <i>acceso solar</i> de la envolvente del edificio. <i>P.M. Esquivias</i> .	151
Figura 138: Efecto de las protecciones solares en el ambiente interior [255].	152
Figura 139: Frecuencia de obtención de los 15 tipos de cielo clasificados en el <i>Cielo General Estándar CIE</i> para los archivos climáticos TMY y TRY de Hong Kong [267].	154
Figura 140: Ábaco para la determinación del valor de referencia de iluminación exterior [27].	155
Figura 141: Mapa temporal y Curvas acumulativas de Iluminancias Horizontal Global y Difusa en Lyon [259].	156
Figura 142: Estimación de la provisión anual de luz natural difusa [1].	156
Figura 143: Variación de valores del Cielo de Diseño en función de la latitud [105].	157
Figura 144: Mapa temporal de Iluminancia Difusa Horizontal e Iluminancia Directa Normal en Nottingham [1].	157
Figura 145: Comparación de los resultados de simulación para diferentes tipos de archivos climáticos y para el clima real en Minneapolis [272].	159
Figura 146: Irradiancia horizontal difusa y directa normal: 18 de Junio en Copenhague. <i>DRY</i> e <i>IWEC</i> [274].	159
Figura 147: Ganancias solares térmicas a través de los huecos en función del tipo de archivo climático [275].	160
Figura 148: Regiones de Iluminación Natural representadas por sus centros climáticos [277].	161
Figura 149: <i>DA</i> para una oficina orientada al Sur en diferentes localizaciones [277].	161
Figura 150: <i>DA</i> en función de la superficie de ventana y su transparencia en tres localizaciones [278].	162

Figura 151: Dependencia de Iluminación para Copenhague (COP), Ginebra (CHE) y Phoenix (PHOE) [274].	162
Figura 152: Influencia de la localización en una oficina con fachadas Norte-Sur [279].	163
Figura 153: Potencial de acceso solar del emplazamiento. <i>P.M. Esquivias</i> . PFC.	165
Figura 154: Los edificios del entorno como «reflectores» de la radiación solar.	166
Figura 155: Bloqueo del <i>acceso solar</i> de los edificios en un entorno urbano debido a otros edificios.	167
Figura 156: <i>Autonomía de Luz Natural</i> debido a la presencia de obstrucciones exteriores [277].	168
Figura 157: Variación de <i>DA</i> y <i>UDI<sub>100-2000</sub></i> en función del ángulo de obstrucción frontal [16].	169
Figura 158: Influencia de las obstrucciones exteriores en una oficina con fachadas Norte-Sur [279].	169
Figura 159: Irradiación global media mensual sobre superficies de diferentes orientaciones (Tsalónica) [299].	170
Figura 160: Análisis del impacto de la orientación en base a valores de <i>DF</i> . <i>P.M. Esquivias</i> . TFM.	170
Figura 161: Análisis de la <i>Autonomía Espacial de Iluminación Natural</i> para diferentes orientaciones [301].	172
Figura 162: <i>DA</i> en función de la superficie de ventana (transmitancia visible 60%) y de la transmitancia visible del vidrio (30% superficie ventana-pared) en las principales orientaciones [278].	172
Figura 163: Efecto de la orientación expresado en valores de <i>DA</i> y <i>UDI</i> [16].	173
Figura 164: Funciones y consideraciones de diseño de las estrategias de iluminación natural [71].	175
Figura 165: Múltiple disposición de las ventanas [303].	176
Figura 166: Espacio Andaluz de Creación Contemporánea (Córdoba, España), <i>Nieto y Sobejano</i> 2012.	177
Figura 167: Distribución de huecos en el muro Sur de la capilla de Notre Dame du Haut Ronchamp (Francia). <i>Le Corbusier</i> 1954.	178
Figura 168: Diversidad y variedad de ventanas. Ventanas del mundo: Oporto. <i>Andre Vicente Gonçalves</i>	179
Figura 169: Variación de la superficie de ventana. <i>P.M. Esquivias</i> [319].	181
Figura 170: <i>DF</i> y <i>DA<sub>500</sub></i> para diferentes <i>WWR</i> , con y sin protección solar [306].	182
Figura 171: Minimum window to wall ratio depending on visible transmittance of window glazing [307].	183
Figura 172: Impacto de la superficie de ventana sobre la <i>Disponibilidad Relativa de Luz Natural</i> según la orientación [320].	184

Figura 173: Impacto de la superficie de ventana en <i>DAR</i> , la demanda de iluminación y las cargas de calefacción y refrigeración para un espacio de oficina en Montreal orientado al Sur [320].	184
Figura 174: <i>UDI</i> (500-1000 lux) en función de la superficie relativa de ventana (transmitancia visible 60%) y la transmitancia visible del vidrio (30% superficie ventana-pared) para las cuatro principales orientaciones [278].	184
Figura 175: Tamaño de ventana que cumple con diferentes criterios energéticos y visuales para las principales orientaciones. Las líneas verticales indican los límites obtenidos a partir de los criterios propuestos. Las áreas sombreadas representan soluciones que no alcanzan los objetivos visuales [309].	185
Figura 176: Efecto de la superficie de ventana en los valores de <i>DA</i> y <i>UDI</i> [16].	186
Figura 177: Relación entre la <i>transmitancia térmica</i> y el <i>Coefficiente de Ganancia Solar (SHGC)</i> , a partir de los datos de la Tabla 15	186
Figura 178: Relación entre el <i>Coefficiente de Ganancia Solar</i> y la <i>Transmitancia visible</i> a partir de los datos de la Tabla 15.	186
Figura 179: Rango de variación de la demanda de calefacción, refrigeración y total al modificar los huecos de las viviendas estudiadas agrupadas por orientación. <i>Proyecto Eficacia</i> . [322].	187
Figura 180: Ahorro energético debido a varios sistemas de regulación de las persianas y dos tipos de acristalamientos [277].	188
Figura 181: <i>DAm<sub>ax</sub></i> y <i>DA<sub>con</sub></i> para <i>WWR</i> y $\tau_{vis}$ [302].	189
Figura 182: <i>UDI</i> (500-1000 lux) en función de la superficie relativa de ventana (transmitancia visible 60%) y la transmitancia visible del vidrio (30% superficie ventana-pared) para las cuatro principales orientaciones [278].	189
Figura 183: Resultados obtenidos para las variables estudiadas [278].	190
Figura 184: Distribución de curvas isolux bajo modelo de <i>Cielo Nublado Estándar CIE</i> . Ventana horizontal y ventana vertical [303].	190
Figura 185: Variaciones en la forma y distribución de la misma superficie de ventana [324].	192
Figura 186: Algunas de las variaciones mostradas en ' <i>Daylight Design Variations Book</i> ' [303].	193
Figura 187: Protecciones solares fijas y móviles.	194
Figura 188: Incertidumbres introducidas por el usuario y los sistemas de regulación [342] [343].	196
Figura 189: Características geométricas de voladizos, salientes laterales, lamas y brise-soleil [64].	197
Figura 190: Resultados para diferentes voladizos [340].	197
Figura 191: <i>UDI</i> 100-2000 para diferentes propuestas de protección solar fija [340].	198
Figura 192: <i>DA</i> y <i>UDI</i> para voladizos, salientes laterales y lamas horizontales y verticales [64].	199

Figura 193: Definición geométrica del modelo de referencia en <i>Ecotect</i> . P.M. Esquivias. ....	229
Figura 194: Malla con los sensores de iluminancia. P.M. Esquivias. ....	230
Figura 195: Definición geométrica del modelo de referencia en <i>DesignBuilder</i> . P.M. Esquivias. ....	231
Figura 196: Límites de las regiones de la <i>WMO</i> . (www.wmo.int).....	233
Figura 197: Subregiones de la Región IV: Europa Central y Occidental (azul), Países Nórdicos y Bálticos (rosa), Iberia (verde), Península Mediterránea, Itálica y Balcánica (amarillo), Europa del Este (naranja claro) y Medio Oriente (Naranja oscuro). (www.wmo.int).....	233
Figura 198: Curva de distribución de frecuencia de $E_{h,g}$ y $E_{h,d}$ según el archivo climático «*.epw» disponible para Sevilla. P.M. Esquivias.....	234
Figura 199: Mapa climático según la <i>clasificación climática de Köppen</i> de la región IV [357].....	235
Figura 200: Ubicación en el mapa de las localizaciones seleccionadas, en negro Sevilla. P.M. Esquivias.....	236
Figura 201. Ángulo de obstrucción frontal. P.M. Esquivias. ....	237
Figura 202: Definición geométrica de los modelos de cálculo en <i>Ecotect</i> . De izquierda a derecha: ángulo de obstrucción de 0°, 15°, 30°, 45°, 60° y 75°. P.M. Esquivias. ....	238
Figura 203: Rosa de los vientos donde se muestran los 16 valores de estudio.....	239
Figura 204: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Orientación” en <i>Ecotect</i> . P.M. Esquivias.....	239
Figura 205: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Superficie de ventana” en <i>Ecotect</i> . De izquierda a derecha: WWR de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 %. P.M. Esquivias.....	243
Figura 206: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Transparencia” en <i>Ecotect</i> . De izquierda a derecha: $\tau_{vis}$ de aproximadamente 90, 80, 70, 60, 50, 40 y 30 %. P.M. Esquivias.....	243
Figura 207: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Posición” en <i>Ecotect</i> . De izquierda a derecha: Posicion de la ventana SI, SC, SD, CI, CC, CD, II, IC e ID. P.M. Esquivias.....	245
Figura 208: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Forma” en <i>Ecotect</i> . De la relación 0’1 (ventana con la máxima altura) a la relación 10 (ventana con la máxima anchura). P.M. Esquivias.....	246
Figura 209: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “División” en <i>Ecotect</i> . De la 1x1 a la matriz 5x5. P.M. Esquivias.....	247
Figura 210: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Distribución” en <i>Ecotect</i> . De izquierda a derecha: modelos 1_S, 2_NS, 2_ES, 2_SO, 3_NSO, 3_NES, 3_ESO y 4_NESO. P.M. Esquivias.....	247

Figura 211: Relación entre el ángulo de obstrucción ( $\alpha$ ) y la profundidad ( $d$ ) del voladizo. <i>P.M. Esquivias</i> .....	249
Figura 212: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Voladizo” en <i>Ecotect</i> . De izquierda a derecha: ángulo de obstrucción de 0°, 15°, 30°, 45° y 60°. <i>P.M. Esquivias</i> .....	249
Figura 213: Ángulo de obstrucción de azimut ( $\alpha$ ) y profundidad ( $d$ ) del saliente lateral. <i>P.M. Esquivias</i> .....	250
Figura 214: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Saliente lateral” en <i>Ecotect</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	251
Figura 215: Definición del ángulo de obstrucción ( $\alpha$ ) y la distancia ( $d$ ) entre las lamas horizontales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	251
Figura 216: Representación gráfica de los modelos de lamas horizontales de la serie “Lamas Fijas” en <i>Ecotect</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	252
Figura 217: Definición del ángulo de obstrucción ( $\alpha$ ) y de la distancia ( $d$ ) entre las lamas verticales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	252
Figura 218: Representación gráfica de los modelos de lamas verticales de la serie “Lamas Fijas” en <i>Ecotect</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	252
Figura 219: Representación gráfica de los modelos de retícula de la serie “Lamas Fijas” en <i>Ecotect</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	253
Figura 220: Características de algunos programas considerados para obtener los resultados de cálculo objeto del trabajo de investigación. <i>P.M. Esquivias</i> .....	257
Figura 221: Subprogramas que componen la herramienta de cálculo <i>DAYSIM</i> [85]......	261
Figura 222: Esquema de funcionamiento de <i>EnergyPlus</i> [89]......	264
Figura 223: Módulo de análisis de radiación solar incidente de <i>Ecotect</i> .....	266
Figura 224: Módulo de análisis de soleamiento de <i>Ecotect</i> .....	266
Figura 225: Catálogo de gráficas de resultados en <i>MatLab</i> .....	267
Figura 226: Incorporación de la librería de materiales y del directorio de exportación de materiales de <i>DAYSIM</i> para utilizar <i>Ecotect</i> como medio de entrada gráfica y material de <i>DAYSIM</i> .....	269
Figura 227: Parámetros de exportación a <i>DAYSIM</i> .....	270
Figura 228: Consideraciones para la elaboración geométrica del modelo tridimensional en <i>DesignBuilder</i> .....	272
Figura 229: ventana de exportación como <i>CSV</i> ......	273
Figura 230: Módulo de análisis de la disponibilidad de radiación solar incidente o acceso solar.....	274
Figura 231: Parámetros de cálculo de la radiación solar incidente y las horas de soleamiento.....	275
Figura 232: Mapas temporales del análisis estadístico instantáneo de los sensores del plano de trabajo [367]......	283



Figura 233: Límite promedio experimental de suficiencia en comparación con el criterio de 2% DFy con la <i>Autonomía de Luz Natural</i> del 50% para unos valores mínimos de iluminancia de 150, 300 y 500 lux [368].	287
Figura 234: Correlación entre tareas visuales y niveles de iluminación. <i>CENTC 169</i> .	287
Figura 235: Ficha descriptiva del modelo de referencia en el libro de <i>Microsoft Excel</i> «00_ref.xlsx». <i>P.M. Esquivias</i> .	299
Figura 236: Representación gráfica del <i>Factor de Iluminación Natural</i> mediante isolíneas y falso color. <i>P.M. Esquivias</i> .	301
Figura 237: Estudio de soleamiento. Proyección estereográfica de un punto del espacio. <i>P.M. Esquivias</i> .	302
Figura 238: Evolución temporal de resultados obtenidos tras una simulación energética con <i>DesignBuilder</i> .	302
Figura 239: Distribución de valores de <i>Autonomía de Luz Natural</i> y los tres rangos de <i>Iluminancia Natural Útil</i> (<100 lux, 100-2000 lux y >2000 lux) sobre el plano de trabajo [319].	303
Figura 240: Mapa de falso color del <i>Factor de Iluminación Natural</i> y del porcentaje de horas de soleamiento anual. [Fig.3 y 4 Tabla 43]. <i>P.M. Esquivias</i> .	305
Figura 241: Mapa de falso color de la <i>radiación solar incidente</i> media horaria. [Fig. 5 Tabla 43]. <i>P.M. Esquivias</i> .	306
Figura 242: Mapa temporal de UDI 300-3000 lux. [Fig 1 Tabla 43]. <i>P.M. Esquivias</i> .	306
Figura 243: Mapa temporal de las ganancias solares a través del hueco. [Fig 2 Tabla 43]. <i>P.M. Esquivias</i> .	307
Figura 244: Curva de Suficiencia Espacial de Iluminación Natural. <i>P.M. Esquivias</i> .	309
Figura 245: Curva de Excesiva Radiación Solar. <i>P.M. Esquivias</i> .	309
Figura 246: Gráfica de análisis mensual del modelo de referencia. <i>P.M. Esquivias</i> .	310
Figura 247: Distribución de iluminancias horarias en los diferentes rangos útiles. <i>P.M. Esquivias</i> .	326
Figura 248: Gráfica de análisis anual de la serie «Localización» (serie 01).	331
Figura 249: Gráfica de análisis del indicador sUDI de la serie «Elementos del entorno» (serie 02).	331
Figura 250: Gráfica de análisis comparativo de sUDI de la serie «Orientación» (serie 03).	332
Figura 251: Gráficas de análisis comparativo de DSg, DSm, DSd y SHGe de la serie «Orientación» (serie 03).	332
Figura 252: Gráfica de evolución mensual del indicador DSg para la serie «Transparencia» (serie 05).	333
Figura 253: Gráfica de análisis del indicador DSd.	333
Figura 254: Incrementos máximo y mínimo según indicador.	334
Figura 255: Esquema y situación del edificio residencial 'Gradins-jardins' del Atelier du pont.	340

Figura 256: Secciones de las fachadas principal, viviendas aterrazadas y fachada hacia medianera .....	340
Figura 257: Vista de la fachada principal y la fachada interior hacia la medianera .....	341
Figura 258: Vista interior del patio. Vista de las fachadas Suroeste del edificio y vista de las obstrucciones .....	341
Figura 259: Mapa temporal de <i>sUDI 300-3000 lux</i> . [Fig 1 Tabla 55]. <i>P.M. Esquivias</i> .....	363
Figura 260: <i>Iluminancia Exterior Global Horizontal</i> del archivo climático de Sevilla. <i>P.M. Esquivias</i> .....	363
Figura 261: Mapa temporal de <i>Iluminancia Natural Útil Simultánea</i> para los rangos 100-300 lux, 300-500 lux, 500-3000 lux y >3000 lux. <i>P.M. Esquivias</i> .....	364
Figura 262: Mapa temporal de las ganancias solares a través del hueco. [Fig 2 Tabla 55]. <i>P.M. Esquivias</i> . .....	365
Figura 263: Mapas de falso color de las condiciones de iluminación e insolación difusa, directa y global .....	365
Figura 264: Curva de Excesiva Radiación Solar. <i>P.M. Esquivias</i> .....	366
Figura 265: Curva de Suficiencia Espacial de Iluminación Natural. <i>P.M. Esquivias</i> .....	367
Figura 266: Gráfica de análisis mensual de los indicadores <i>DSg, DSd, DSm, SHGe y sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	367
Figura 267: Ubicación en el mapa de las localizaciones seleccionadas, en negro Sevilla. <i>P.M. Esquivias</i> .....	369
Figura 268: Serie 1: Localización. Indicadores anuales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	370
Figura 269: Localización. mediana anual <i>sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	371
Figura 270: Iluminancia Exterior Horizontal global (color sólido) y difusa (color suave) con una frecuencia del 50% de las horas diurnas según los datos registrados en los archivos climáticos estandarizados. <i>P.M. Esquivias</i> .....	373
Figura 271: Variación de los indicadores <i>DSg, DSd, DSm y SHGe</i> respecto al modelo de referencia debido a la localización. <i>P.M. Esquivias</i> .....	374
Figura 272: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> debido a la localización. <i>P.M. Esquivias</i> .....	375
Figura 273: Valores mensuales de <i>DSg</i> de las localizaciones escogidas. <i>P.M. Esquivias</i> .....	376
Figura 274: Valores mensuales de <i>SHGe</i> para las localizaciones escogidas. <i>P.M. Esquivias</i> .....	377
Figura 275: Valores mensuales de <i>sUDI 500-3000</i> para las localizaciones escogidas. <i>P.M. Esquivias</i> .....	377
Figura 276: Definición geométrica de los modelos de cálculo en <i>Ecotect</i> . De izquierda a derecha: ángulo de obstrucción de 0°, 15°, 30°, 45°, 60° y 75°. <i>P.M. Esquivias</i> . .....	381
Figura 277: Serie 2: Ángulo de obstrucción frontal. Indicadores anuales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	381
Figura 278: Ángulo de obstrucción frontal. mediana anual <i>sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	382

Figura 279: Posición relativa del elemento de obstrucción y la trayectoria solar anual. <i>P.M. Esquivias</i> .....	383
Figura 280: Sombras arrojadas sobre la fachada acristalada durante el 21 de diciembre de 09 a 18 h (GMT+1) en cada modelo de simulación de la Serie 2. <i>P.M. Esquivias</i> .....	383
Figura 281: Sombras arrojadas sobre la fachada acristalada durante el 21 de marzo de 09 a 18 h (GMT+1) en cada modelo de simulación de la Serie 2. <i>P.M. Esquivias</i> .....	384
Figura 282: Variación de los indicadores <i>DSg</i> , <i>DSd</i> , <i>DSm</i> y <i>SHGe</i> respecto al modelo de referencia debido al ángulo de obstrucción. <i>P.M. Esquivias</i> .....	384
Figura 283: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> respecto al modelo de referencia debido al ángulo de obstrucción frontal. <i>P.M. Esquivias</i> .....	385
Figura 284: Valores mensuales de <i>DSg</i> de los ángulos de obstrucción. <i>P.M. Esquivias</i> .....	386
Figura 285: Valores mensuales de <i>SHGe</i> para los ángulos de obstrucción. <i>P.M. Esquivias</i> .....	386
Figura 286: Valores mensuales de <i>sUDI 500-3000</i> para los diferentes ángulos de obstrucción. <i>P.M. Esquivias</i> .....	387
Figura 287: Rosa de los vientos donde se muestran los 16 valores de estudio .....	389
Figura 288: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Orientación” en <i>Ecotect</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	389
Figura 289: Serie 3: Orientación. Indicadores anuales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	390
Figura 290: Orientación. mediana anual <i>sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	391
Figura 291: Variación de los indicadores <i>DSg</i> , <i>DSd</i> , <i>DSm</i> y <i>SHGe</i> respecto al modelo de referencia debido a la orientación. <i>P.M. Esquivias</i> .....	392
Figura 292: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> respecto al modelo de referencia debido a la orientación. <i>P.M. Esquivias</i> .....	393
Figura 293: Valores mensuales de <i>DSg</i> según la orientación. <i>P.M. Esquivias</i> .....	394
Figura 294: Valores mensuales de <i>SHGe</i> según la orientación. <i>P.M. Esquivias</i> .....	394
Figura 295: Valores mensuales de <i>sUDI500-3000</i> según la orientación. <i>P.M. Esquivias</i> .....	395
Figura 296: Valores mensuales de <i>sUDI300-500</i> según la orientación. <i>P.M. Esquivias</i> .....	395
Figura 297: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Superficie de ventana” en <i>Ecotect</i> . De izquierda a derecha: WWR de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 %. <i>P.M. Esquivias</i> .....	401
Figura 298: Serie 4: Tamaño del hueco. Indicadores anuales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	402
Figura 299: Superficie de la ventana. mediana anual <i>sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	403
Figura 300: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> respecto al modelo de referencia debido al tamaño del hueco. <i>P.M. Esquivias</i> .....	405
Figura 301: Variación del conjunto de indicadores <i>DSg</i> , <i>DSd</i> , <i>DSm</i> y <i>SHGe</i> respecto al modelo de referencia debido al tamaño del hueco. <i>P.M. Esquivias</i> .....	406

Figura 302: DSg y SHGe mensual para una superficie relativa entre 10% y 40% .....	407
Figura 303: sUDI >3000 mensual para una superficie entre el 10 y el 40% .....	407
Figura 304: sUDI 500-3000 mensual para una superficie entre el 10 y el 40% .....	408
Figura 305: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Transparencia” en <i>Ecotect</i> . De izquierda a derecha: $\tau_{vis}$ de aproximadamente 90, 80, 70, 60, 50, 40 y 30 %. <i>P.M. Esquivias</i> .....	409
Figura 306: Serie 5: Transparencia del vidrio. Indicadores anuales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	410
Figura 307: Transparencia de la ventana. mediana anual <i>sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	410
Figura 308: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> respecto al modelo de referencia debido a la transparencia del vidrio. <i>P.M. Esquivias</i> .....	412
Figura 309: Variación de <i>DSg</i> , <i>DSd</i> , <i>DSm</i> y <i>SHGe</i> respecto al modelo de referencia debido a la transmitancia visible y solar del vidrio. <i>P.M. Esquivias</i> .....	413
Figura 310: Valores mensuales de <i>DSg</i> según la transparencia del vidrio. <i>P.M. Esquivias</i> .....	414
Figura 311: Valores mensuales de <i>SHGe</i> según la transparencia del vidrio. <i>P.M. Esquivias</i> .....	414
Figura 312: Valores mensuales de <i>sUDI 500-3000</i> según la transparencia del vidrio. <i>P.M. Esquivias</i> .....	415
Figura 313: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Posición” en <i>Ecotect</i> . De izquierda a derecha: Posición de la ventana SI, SC, SD, CI, CC, CD, II, IC e ID. <i>P.M. Esquivias</i> .....	417
Figura 314: Serie 6: Posición del hueco. Indicadores anuales.....	418
Figura 315: Posición de la ventana. mediana anual <i>sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	419
Figura 316: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> respecto al modelo de referencia debido a la posición del hueco. <i>P.M. Esquivias</i> .....	420
Figura 317: Variación de los indicadores <i>DSg</i> , <i>DSd</i> , <i>DSm</i> y <i>SHGe</i> respecto al modelo de referencia debido a la posición del hueco. <i>P.M. Esquivias</i> .....	420
Figura 318: Valores mensuales de <i>DSg</i> en función de la posición del hueco. <i>P.M.</i> <i>Esquivias</i> .....	421
Figura 319: Valores mensuales de <i>sUDI 100-300</i> en función de la posición. <i>P.M.</i> <i>Esquivias</i> .....	422
Figura 320: Valores mensuales de <i>sUDI 500-3000</i> en función de la posición. <i>P.M.</i> <i>Esquivias</i> .....	422
Figura 321: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Forma” en <i>Ecotect</i> . De la relación 0’1 (ventana con la máxima altura) a la relación 10 (ventana con la máxima anchura). <i>P.M. Esquivias</i> .....	425
Figura 322: Serie 7: Forma del hueco. Indicadores anuales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	426
Figura 323: Forma de la ventana. mediana anual <i>sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	427
Figura 324: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> respecto al modelo de referencia debido a la forma del hueco. <i>P.M. Esquivias</i> .....	428

Figura 325: Variación de los indicadores <i>DSg</i> , <i>DSd</i> , <i>DSm</i> y <i>SHGe</i> respecto al modelo de referencia debido a la forma del hueco. <i>P.M. Esquivias</i> .....	429
Figura 326: Valores mensuales de <i>sUDI 500-3000</i> según la forma del hueco. <i>P.M. Esquivias</i> .....	429
Figura 327: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “División” en <i>Ecotect</i> . De la 1x1 a la matriz 5x5. <i>P.M. Esquivias</i> .....	431
Figura 328: Serie 8: División del hueco. Indicadores anuales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	432
Figura 329: División de la ventana. mediana anual <i>sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	433
Figura 330: Variación de los indicadores <i>DSg</i> , <i>DSd</i> , <i>DSm</i> y <i>SHGe</i> respecto al modelo de referencia debido a la división del hueco. <i>P.M. Esquivias</i> .....	434
Figura 331: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> respecto al modelo de referencia debido a la división del hueco. <i>P.M. Esquivias</i> .....	435
Figura 332: Valores mensuales de <i>DSg</i> en función de la división del hueco. <i>P.M. Esquivias</i> .....	435
Figura 333: Valores mensuales de <i>sUDI 500-3000</i> en función de la división del hueco. <i>P.M. Esquivias</i> .....	436
Figura 334: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Distribución” en <i>Ecotect</i> . De izquierda a derecha: modelos 1_S, 2_NS, 2_ES, 2_SO, 3_NS, 3_NES, 3_ESO y 4_NESO. <i>P.M. Esquivias</i> .....	437
Figura 335: Serie 9: Distribución de los huecos. Indicadores anuales .....	437
Figura 336: Distribución de la ventana. mediana anual <i>sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	439
Figura 337: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> respecto al modelo de referencia debido a la distribución de los huecos. <i>P.M. Esquivias</i> .....	440
Figura 338: Variación de los indicadores <i>DSg</i> , <i>DSd</i> , <i>DSm</i> y <i>SHGe</i> respecto al modelo de referencia debido a la distribución de los huecos. <i>P.M. Esquivias</i> .....	440
Figura 339: Valores mensuales de <i>SHGe</i> debido a la distribución del hueco. <i>P.M. Esquivias</i> .....	441
Figura 340: Valores mensuales de <i>sUDI 500-3000</i> debido a la distribución del hueco. <i>P.M. Esquivias</i> .....	441
Figura 341: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Voladizo” en <i>Ecotect</i> . De izquierda a derecha: ángulo de obstrucción de 0°, 15°, 30°, 45° y 60°. <i>P.M. Esquivias</i> .....	445
Figura 342: Serie 10: Voladizo. Indicadores anuales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	446
Figura 343: Voladizo. mediana anual <i>sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	447
Figura 344: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> respecto al modelo de referencia debido a la presencia de un voladizo. <i>P.M. Esquivias</i> .....	447
Figura 345: Variación de los indicadores <i>DSg</i> , <i>DSd</i> , <i>DSm</i> y <i>SHGe</i> respecto al modelo de referencia debido a la presencia de un voladizo. <i>P.M. Esquivias</i> .....	448

Figura 346: Valores mensuales de <i>SHGe</i> debido a la presencia de un voladizo. <i>P.M. Esquivias</i> .....	448
Figura 347: Variación de los indicadores <i>DSg</i> , <i>DSd</i> , <i>DSm</i> y <i>SHGe</i> respecto al modelo de referencia debido a la presencia de un voladizo. <i>P.M. Esquivias</i> .....	449
Figura 348: Representación gráfica de los modelos de cálculo de la serie “Saliente lateral” en <i>Ecotect</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	451
Figura 349: Serie 11: Saliente lateral. Indicadores anuales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	452
Figura 350: Saliente lateral. mediana anual <i>sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	453
Figura 351: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> respecto al modelo de referencia debido a la presencia de salientes laterales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	454
Figura 352: Variación de los indicadores <i>DSg</i> , <i>DSd</i> , <i>DSm</i> y <i>SHGe</i> respecto al modelo de referencia debido a la presencia de salientes laterales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	454
Figura 353: Valores mensuales de <i>SHGe</i> debido a la presencia de saliente lateral. <i>P.M. Esquivias</i> .....	455
Figura 354: Representación gráfica de los modelos de lamas horizontales de la serie “Lamas Fijas” en <i>Ecotect</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	457
Figura 355: Representación gráfica de los modelos de lamas verticales de la serie “Lamas Fijas” en <i>Ecotect</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	457
Figura 356: Representación gráfica de los modelos de retícula de la serie “Lamas Fijas” en <i>Ecotect</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	458
Figura 357: Serie 12: Lamas fijas horizontales. Indicadores anuales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	459
Figura 358: Lamas fijas horizontales. mediana anual <i>sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	459
Figura 359: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> respecto al modelo de referencia debido a la presencia de lamas fijas horizontales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	460
Figura 360: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> respecto al modelo de referencia debido a la presencia de lamas fijas horizontales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	461
Figura 361: Valores mensuales de <i>DSg</i> debido a la presencia de lamas horizontales fijas. <i>P.M. Esquivias</i> .....	461
Figura 362: Valores mensuales de <i>SHGe</i> debido a la presencia de lamas horizontales fijas. <i>P.M. Esquivias</i> .....	462
Figura 363: Valores mensuales de <i>sUDI 500-3000</i> debido a la presencia de lamas horizontales fijas. <i>P.M. Esquivias</i> .....	462
Figura 364: Serie 12: Lamas fijas verticales. Indicadores anuales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	463
Figura 365: Lamas Fijas verticales. mediana anual <i>sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	464
Figura 366: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> respecto al modelo de referencia debido a la presencia de lamas fijas verticales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	464
Figura 367: Variación de los indicadores <i>DSg</i> , <i>DSd</i> , <i>DSm</i> y <i>SHGe</i> respecto al modelo de referencia debido a la presencia de lamas fijas verticales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	465

Figura 368: Valores mensuales de <i>DSg</i> debido a la presencia de lamas fijas verticales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	465
Figura 369: Valores mensuales de <i>sUDI 500-3000</i> debido a la presencia de lamas fijas verticales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	466
Figura 370: Serie 12: Retícula de lamas fijas. Indicadores anuales. <i>P.M. Esquivias</i> .....	467
Figura 371: Retícula de lamas fijas. mediana anual <i>sUDI</i> . <i>P.M. Esquivias</i> .....	467
Figura 372: Variación del conjunto de indicadores <i>sUDI</i> respecto al modelo de referencia debido a la presencia de una retícula de lamas fijas. <i>P.M. Esquivias</i> .....	468
Figura 373: Variación de los indicadores <i>DSg</i> , <i>DSd</i> , <i>DSm</i> y <i>SHGe</i> respecto al modelo de referencia debido a la presencia de una retícula de lamas fijas. <i>P.M. Esquivias</i> .....	469
Figura 374: Valores mensuales de <i>DSg</i> debido a una retícula de lamas fijas. <i>P.M.</i> <i>Esquivias</i> .....	469
Figura 375: Valores mensuales de <i>sUDI 500-3000</i> debido a una retícula de lamas fijas. <i>P.M. Esquivias</i> .....	470
Figura 376: <i>DSd</i> . Valores estadísticos, referencia y requisito según parámetro. <i>P.M.</i> <i>Esquivias</i> .....	474
Figura 377: <i>DSg</i> . Valores estadísticos, referencia y requisito según parámetro. <i>P.M.</i> <i>Esquivias</i> .....	476
Figura 378: <i>DSm</i> . Valores estadísticos, referencia y requisito según parámetro. <i>P.M.</i> <i>Esquivias</i> .....	478
Figura 379: <i>sUDI 100-300</i> . Valores estadísticos y referencia según parámetro. <i>P.M.</i> <i>Esquivias</i> .....	480
Figura 380: <i>sUDI 300-500</i> . Valores estadísticos y referencia según parámetro. <i>P.M.</i> <i>Esquivias</i> .....	482
Figura 381: <i>sUDI 500-3000</i> . Valores estadísticos y referencia según parámetro. <i>P.M.</i> <i>Esquivias</i> .....	484
Figura 382: <i>sUDI 300-3000</i> . Valores estadísticos, referencia y requisito según parámetro. <i>P.M. Esquivias</i> .....	486
Figura 383: <i>SHGe</i> . Valores estadísticos, referencia y requisito según parámetro. <i>P.M.</i> <i>Esquivias</i> .....	488
Figura 384: <i>sUDI &gt; 3000</i> . Valores estadísticos y referencia según parámetro. <i>P.M.</i> <i>Esquivias</i> .....	490
Figura 385: <i>sUDI &lt; 100</i> . Valores estadísticos y referencia según parámetro. <i>P.M. Esquivias</i> .....	491
Figura 386: Incrementos máximo y mínimo según indicador.....	497
Figura 387: Incremento neto de cada parámetro según indicador .....	497
Figura 388: Esquema y situación del edificio residencial ‘Gradins-jardins’ del Atelier du pont [372] .....	501
Figura 389: Secciones de las fachadas principal, viviendas aterrazadas y fachada hacia medianera .....	503

Figura 390: Vista de la fachada principal y la fachada interior hacia la medianera ..... 504



## Ecuaciones

Ecuación 1: Absortividad, reflectividad y transmisividad .....	68
Ecuación 2: Formulación del modelo de <i>Cielo Nublado</i> (Moon & Spencer, 1942) [87].....	72
Ecuación 3: <i>Eficacia luminosa</i> [112]. .....	73
Ecuación 4: Claridad del cielo [112]. .....	74
Ecuación 5: Brillo del cielo [112]. .....	74
Ecuación 6: Contenido de agua precipitable en la atmósfera [112]. .....	74
Ecuación 7: Estructura de los modelos de <i>eficacia luminosa</i> [112]. .....	75
Ecuación 8: Expresión generalizada de la función F de condiciones de insolación [112]. .....	75
Ecuación 9: Conversión de <i>irradiancia global</i> a <i>iluminancia global</i> [112]. .....	76
Ecuación 10: Conversión de <i>irradiancia difusa</i> a <i>iluminancia difusa</i> [112]. .....	76
Ecuación 11: Conversión de <i>irradiancia directa</i> a <i>iluminancia directa</i> [112]. .....	76
Ecuación 12: Obtención de la <i>luminancia</i> del cénit a partir de la irradiancia difusa [112]. .....	76
Ecuación 13: <i>Luminancia</i> relativa de un elemento arbitrario de cielo [87]. .....	77
Ecuación 14: Definición de <i>Factor de Iluminación natural</i> [62]. .....	80
Ecuación 15: Factor de Iluminación como suma componentes [62]. .....	80
Ecuación 16: Definición del <i>Coefficiente de Luz Natural</i> [110]. .....	87
Ecuación 17: Iluminancia total en un punto de una habitación [110]. .....	88
Ecuación 18: Relación entre <i>UDI</i> y <i>DA</i> [132]. .....	92
Ecuación 19: Flujo de calor a través de un elemento semitransparente [135]. .....	97
Ecuación 20: Ecuación de <i>Lynes</i> para la <i>profundidad máxima</i> [225]. .....	122
Ecuación 21: <i>Apertura efectiva ajustada</i> , según el estudio de viabilidad de <i>iluminación natural</i> [225]. .....	123
Ecuación 22: <i>Factor de Iluminación Natural Medio</i> ( <i>Average Daylight Factor</i> ) .....	135
Ecuación 23: Determinación del ángulo de obstrucción [230]. .....	139
Ecuación 24: Fórmula de Tregenza para la determinación de la <i>iluminancia exterior difusa</i> [105]. .....	155
Ecuación 25: Factor de Iluminación Natural en base climática .....	286
Ecuación 26: Carga térmica por radiación solar a través de un elemento semitransparente [135]. .....	291
Ecuación 27: Factor de Iluminación Natural en base climática .....	389



## Tablas

Tabla 1: Resumen de parámetros, variables independientes y valores de estudio. ....	XI
Tabla 2: Salida de datos de los programas de simulación .....	XIII
Tabla 3: relación entre el nivel de iluminación y el nivel de precisión de la tarea visual .....	XV
Tabla 4: Valores binarios de $\epsilon$ [112]. .....	75
Tabla 5: Coeficientes de los modelos de <i>eficacia luminosa</i> directa y de <i>luminancia</i> del cénit [87]. .....	76
Tabla 6: <i>Cielo General Estándar CIE</i> . Integración de 15 tipos diferentes de cielo [87]. .....	78
Tabla 7: Ángulo de obstrucción máximo y <i>Componente Vertical de Cielo</i> en función de la latitud [46]. .....	120
Tabla 8: Condiciones mínimas de iluminación de superficies distintas del área de trabajo [113]. .....	126
Tabla 9: clasificación de la apariencia de los espacios en función de su <i>DF</i> [232]. .....	127
Tabla 10: Requisitos de iluminación natural en la normativa japonesa [221]. .....	133
Tabla 11: Recomendaciones de <i>ADF</i> en viviendas dadas por <i>BRE</i> [114]. .....	135
Tabla 12: Especificaciones sobre la dimensión mínima de los patios de parcela [227]. .....	140
Tabla 13: Carga interna en función de la densidad de las fuentes internas [137]. .....	143
Tabla 14: Implicaciones de utilizar diferentes archivos climáticos en la simulación de los edificios [271]. .....	158
Tabla 15: Valores típicos de transmitancia térmica, solar y visible de diferentes sistemas de ventana [133] [316]. .....	180
Tabla 16: Resumen de parámetros, variables independientes y valores de estudio. ....	228
Tabla 17: Condiciones geométricas y ópticas de las superficies opacas del modelo de referencia. ....	229
Tabla 18: Condiciones exteriores del modelo de referencia. ....	230
Tabla 19: Características de las superficies semitransparentes del modelo de referencia. ....	231
Tabla 20: Transmitancia térmica límite de los elementos de la envolvente del edificio de referencia para la zona climática B4 [137]. .....	231
Tabla 21: Clasificación climática de Köppen. [357] .....	234
Tabla 22: Localizaciones de la Region 6 seleccionadas tras aplicar los criterios indicados en el texto. ....	235
Tabla 23: Valores del ángulo de obstrucción y de sus variables dependientes. ....	238
Tabla 24: Valores del ángulo de orientación. ....	239
Tabla 25: Valores de Superficie de ventana y sus variables dependientes. ....	242
Tabla 26: Productos de ventana disponibles en el mercado, escogidos según su transmitancia visible. ....	244

Tabla 27: Posiciones relativas y distancias a los paramentos .....	244
Tabla 28: Valores del Factor de Forma y de los parámetros afectados .....	245
Tabla 29: Opciones de división de ventana y parámetros afectados .....	246
Tabla 30: Distribución de ventanas en diferentes paramentos.....	247
Tabla 31: Valores de Ángulo de obstrucción del voladizo y su profundidad .....	250
Tabla 32: Ángulo de obstrucción de los salientes y valores de los parámetros afectados .....	251
Tabla 33: Dispositivos de lamas fijos: valores de estudio.....	253
Tabla 34: Características de los programas de simulación de iluminación más habituales. ....	258
Tabla 35: Características de ganancia solar e insolación de algunos programas de cálculo. ....	263
Tabla 36: parámetros de simulación de <i>Radiance</i> . Escena de complejidad 2 .....	270
Tabla 37: Características principales de los indicadores más habituales. $SHG_{\perp}$ = ganancia solar térmica; $A_s$ = superficie del hueco; $F$ = irradiancia exterior total incidente; $g_{\perp}$ = factor solar del hueco. ....	278
Tabla 38: Valor mínimo de $DF_{cb\ min}$ para cada localización de estudio. ....	286
Tabla 39: Rangos de iluminación y tareas visuales.....	289
Tabla 40: Salida de datos de los programas de simulación .....	297
Tabla 41: Datos primarios y programas de obtención .....	313
Tabla 42: Resultados descriptivos: Indicadores, formato de expresión, datos de simulación, programas de obtención y procedimientos de tratamiento. ....	313
Tabla 43: Procesos seguidos durante la ejecución de rutinas en <i>MATLAB</i> .....	315
Tabla 44: Valores estadísticos de la distribución de valores sobre el plano de trabajo .....	322
Tabla 45: Resultados analíticos: Indicadores, formato de expresión, datos de origen, programas de obtención y procedimiento seguido.....	323
Tabla 46: $DF_{cb\ min}$ mensual y anual en base a los valores de <i>iluminancia horizontal difusa exterior</i> ( $E_{d,h\ med}$ ) con una frecuencia diaria de aproximadamente de el 50% para las condiciones climáticas de Sevilla. [Anexo A].....	325
Tabla 47: Valores mensuales y anuales de <i>Suficiencia de Luz Natural Global, Mantenido y Difusa</i> del modelo de referencia. En color los valores extremos.....	326
Tabla 48: Mediana de valores mensuales y anuales de % del plano de trabajo del modelo de referencia que se encuentra en el mismo instante en un determinado rango de iluminancias. En color los valores extremos. ....	327
Tabla 49: Valor de ganancia solar límite para el modelo de referencia .....	328
Tabla 50: Valores de $SHGe$ del modelo de referencia y su relación con $sUDI_{>3000}$ . En color los valores extremos. ....	328
Tabla 51: Ficha síntesis-análisis del modelo de referencia .....	338

Tabla 52: Resumen de parámetros, variables independientes y valores de estudio. ....	345
Tabla 53: Salida de datos de los programas de simulación .....	347
Tabla 54: Procedimientos aplicados y resultados obtenidos por cada dato primario .....	353
Tabla 55: Procesos seguidos durante la ejecución de rutinas en <i>MATLAB</i> .....	361
Tabla 56: Resultados analíticos: Indicadores, formato de expresión, datos de origen, programas de obtención y procedimiento seguido. ....	362
Tabla 57: Análisis estadístico de la distribución de valores sobre el plano de trabajo. ....	365
Tabla 58: Valores mensuales de los indicadores de iluminación natural e insolación <i>DSg</i> , <i>DSd</i> , <i>Dsm</i> , <i>SHGe</i> y <i>sUDI</i> . ....	368
Tabla 59: Localizaciones de la Region 6 seleccionadas tras aplicar los criterios indicados en el texto. ....	369
Tabla 60: Serie 1: Localización. Indicadores anuales .....	371
Tabla 61: Serie 1: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia .....	375
Tabla 62: Valores del ángulo de obstrucción y de sus variables dependientes .....	381
Tabla 63: Serie 2: Ángulo de obstrucción frontal. Indicadores anuales.....	383
Tabla 64: Serie 2: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia. ....	385
Tabla 65: Valores del ángulo de orientación.....	389
Tabla 66: Serie 3: Orientación. Indicadores anuales .....	390
Tabla 67: Serie 3: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia .....	393
Tabla 68: Valores de Superficie de ventana y sus variables dependientes. ....	401
Tabla 69: Serie 4: Tamaño de hueco. Indicadores anuales .....	403
Tabla 70: Serie 4: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia .....	405
Tabla 71: Productos de ventana disponibles en el mercado, escogidos según su transmitancia visible. ....	409
Tabla 72: Serie 5: Transparencia del vidrio. Indicadores anuales .....	411
Tabla 73: Serie 5: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia. ....	412
Tabla 74: Posiciones relativas y distancias a los paramentos .....	417
Tabla 75: Serie 6: Posición del hueco. Indicadores anuales.....	418
Tabla 76: Serie 6: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia.....	419
Tabla 77: Valores del Factor de Forma y de los parámetros afectados.....	425
Tabla 78: Serie 7: Forma del hueco. Indicadores anuales .....	426
Tabla 79: Serie 7: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia.....	428
Tabla 80: Opciones de división de ventana y parámetros afectados .....	431
Tabla 81: Serie 8: División del hueco. Indicadores anuales .....	432
Tabla 82: Serie 8: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia .....	434

Tabla 83: Distribución de ventanas en diferentes paramentos .....	437
Tabla 84: Serie 9: Distribución de los huecos. Indicadores anuales .....	438
Tabla 85: Serie 9: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia.....	439
Tabla 86: Valores de Ángulo de obstrucción del voladizo y su profundidad.....	445
Tabla 87: Serie 10: Voladizo. Indicadores anuales .....	446
Tabla 88: Serie 9: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia.....	447
Tabla 89: Ángulo de obstrucción de los salientes y valores de los parámetros afectados .....	451
Tabla 90: Serie 11:Saliente lateral. Indicadores anuales.....	452
Tabla 91: Serie 9: Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia .....	453
Tabla 92: Dispositivos de lamas fijos: valores de estudio .....	458
Tabla 93: Serie 12:Lamas fijas horizontales. Indicadores anuales .....	458
Tabla 94: Serie 12: Lamas fijas horizontales. Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia.....	460
Tabla 95: Serie 12: Lamas fijas verticales. Indicadores anuales .....	463
Tabla 96: Serie 12: Lamas fijas verticales. Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia.....	464
Tabla 97: Serie 12: Retícula de lamas fijas. Indicadores anuales .....	466
Tabla 98: Serie 12: Retícula de lamas fijas. Proporción de los indicadores respecto a los valores de referencia.....	468
Tabla 99: Valores estadísticos del indicador <i>DSd</i> .....	473
Tabla 100: Valores estadísticos del indicador <i>DSg</i> .....	475
Tabla 101: Valores estadísticos del indicador <i>DSm</i> .....	477
Tabla 102: Valores estadísticos de cada parámetro para <i>sUDI 100-300</i> .....	479
Tabla 103: Valores estadísticos de cada parámetro para <i>sUDI 300-500</i> .....	481
Tabla 104: Valores estadísticos de cada parámetro para <i>sUDI 500-3000</i> .....	483
Tabla 105: Valores estadísticos de cada parámetro para <i>sUDI 300-3000</i> .....	485
Tabla 106: Valores estadísticos de cada parámetro para <i>SHGe</i> .....	487
Tabla 107: Valores estadísticos de cada parámetro para <i>sUDI&gt;3000</i> .....	489
Tabla 108: Valores estadísticos de cada parámetro para <i>sUDI&lt;100</i> .....	491
Tabla 109: Orden de influencia de cada parámetro sobre varios indicadores de iluminación natural e insolación.....	493
Tabla 110: Orden de influencia de cada parámetro sobre los rangos de iluminancia .....	495
Tabla 111: Incrementos máximo y mínimo respecto a requisito .....	496
Tabla 112: Incremento neto según indicador.....	498

Tabla 113: Aplicación de los factores de proporcionalidad de la Localización y la Orientación.....	502
Tabla 114: Simulación de la incorporación de la Localización y la Orientación .....	502
Tabla 115: Aplicación del factor de proporcionalidad relativo a la obstrucción frontal sobre la fachada Noreste y simulación de las mismas condiciones.....	504
Tabla 116: Simulación de una superficie mayor sobre los extremos del rango de obstrucción frontal.....	505





## Ordenes de programación

Orden programación 1: Análisis horario del perfil anual de iluminancias. Obtención de la serie temporal <i>DSg</i> .....	316
Orden programación 2: Análisis horario del perfil anual de iluminancias. Obtención de la serie temporal <i>sUDI</i> <sub>&lt;100</sub> .....	316
Orden programación 3: Análisis horario del perfil anual de iluminancias. Obtención de la serie temporal <i>sUDI</i> <sub>100-300</sub> .....	316
Orden programación 4: Análisis horario del perfil anual de iluminancias. Obtención de la serie temporal <i>sUDI</i> <sub>300-500</sub> .....	317
Orden programación 5: Análisis horario del perfil anual de iluminancias. Obtención de la serie temporal <i>sUDI</i> <sub>500-3000</sub> .....	317
Orden programación 6: Análisis horario del perfil anual de iluminancias. Obtención de la serie temporal <i>sUDI</i> <sub>&gt;3000</sub> .....	317
Orden programación 7: Obtención del archivo de <i>Indicadores Dinámicos de Iluminación Natural</i> en base al análisis horario del perfil anual de iluminancias. Archivo «DDMh.DA».....	317
Orden programación 8: Análisis horario del perfil anual de iluminancias. Obtención y redimensionado de la serie temporal <i>sUDI</i> <sub>300-3000</sub> .....	318
Orden programación 9: Redimensionado de la serie temporal <i>SHG</i> .....	318
Orden programación 10: Redimensionado de la serie de valores <i>DF</i> en cada sensor.....	318
Orden programación 11: Extracción de las <i>horas de soleamiento</i> totales, repercusión sobre las horas diarias anuales y redimensionado.....	320
Orden programación 12: Extracción de los datos de <i>radiación solar incidente</i> , discriminación de los valores diurnos y redimensionado.....	321
Orden programación 13: Obtención de los valores horarios diurnos de las series temporales contenidas en el archivo «DDMh.DA».....	324
Orden programación 14: Obtención de los valores mensuales de <i>DSg</i> .....	325
Orden programación 15: Obtención de los valores mensuales de <i>DSm</i> .....	325
Orden programación 16: Obtención de los valores mensuales de <i>DSd</i> .....	326
Orden programación 17: Obtención de los valores mensuales de <i>sUDI</i> .....	327
Orden programación 18: Obtención de valores mensuales de <i>SHGe</i> .....	328
Orden programación 19: Obtención del valor mensual <i>sUDI</i> <sub>&gt;3000</sub> para el percentil de horas de <i>SHGe</i> .....	328



## Fuentes bibliográficas

- [1] J. Mardaljevic, "Daylight, Indoor Illumination and Human Behaviour," in *Sustainable Built Environments*, V. Loftness and D. Haase, Eds. New York: Springer New York, 2013, pp. 69-111.
- [2] W. M. C. Lam, *Sunlighting as formgiver for architecture*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1986.
- [3] F. Moore, *Concepts and practice of architectural daylighting*. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1991.
- [4] N. Baker, A. Fanchiotti, and K. Steemers, *Daylighting in Architecture. A European Reference Book*. London: James & James (Science Publishers) Ltd, 1993.
- [5] L. Roche, E. Dewey, and P. Littlefair, "Occupant reactions to daylight in offices," *Lighting Research and Technology*, vol. 32, no. 3, pp. 119-126, 2000.
- [6] O. Walkenhorst, J. Luther, C. Reinhart, and J. Timmer, "Dynamic annual daylight simulations based on one-hour-and one-minute means of irradiance data," *Solar Energy*, vol. 72, no. 5, pp. 385-395, 2002.
- [7] W. C. Lam, *Perception and Lighting as Formgivers for Architecture*. New York: McGraw Hill, 1977.
- [8] J. A. Veitch, "Principles of healthy lighting: role for daylight," *International Daylighting RD&A*, vol. 5, pp. 5-6, 2003.
- [9] M.-C. Dubois and A. Blomsterberg, "Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review," *Energy and Buildings*, no. 43, pp. 2572-2582, 2011.
- [10] M. Bodart and A. De Herde, "Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting," *Energy and Buildings*, no. 34, pp. 421-429, 2002.
- [11] M. B. C. Aries, J. A. Veitch, and G. R. Newsham, "Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort," *Journal of Environmental Psychology*, vol. 30, pp. 533-541, 2010.
- [12] P. Laforgue, B. Souyri, M. Fontoyont, and G. Achard, "Simulation of visual and thermal comfort related to daylighting and solar radiation in office buildings," in *Fifth International IBPSA Conference*, Prague, 1997.
- [13] C. F. Reinhart, J. Mardaljevic, and Z. Rogers, "Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design," *Leukos*, vol. 3, no. 1, pp. 1-25, 2006.
- [14] A. Nabil and J. Mardaljevic, "Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings," *Lighting Research and Technology*, vol. 37, no. 1, pp. 41-59, 2005.
- [15] J. M. L. Gagne and M. Andersen, "A daylighting knowledge base for performance-driven façade design exploration," *Leukos*, vol. 08, no. 02, pp. 93-101, 2011.
- [16] S. Cammarano, A. Pellegrino, V. R. M. Lo Verso, and C. Aghemo, "Assessment of daylight in rooms with different architectural features," *Building Research and Information*, vol. 43, no. 2, pp. 222-237, 2015.
- [17] C. F. Reinhart and J. Wienold, "The daylighting dashboard-A simulation - based design analysis for daylight spaces," *Building and Environment*, vol. 46, pp. 386-396, 2011.
- [18] The U.S. Green Building Council. LEED: leadership in energy and environmental design. [Online]. <http://www.usgbc.org/leed>
- [19] Building Research Establishment. BREEAM: the BRE environmental assessment method. [Online]. <http://www.breeam.org/>

- [20] J. Speirs, A. Tischhauser, and M. Major, *Made of Light. The Art of Light and Architecture*. Basel: Birkhäuser, 2005.
- [21] R. Kittler, M. Kocifaj, and S. Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology*. Springer New York, 2012.
- [22] C. Anthon, *Xenophon's Memorabilia of Socrates*. New York: Harper & Brothers Publishers, 1861.
- [23] J. Ortiz y Sanz, *Los 10 libros de arquitectura de Vitruvio*. Madrid: Akal, 2007.
- [24] Dpto. Construcciones Arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. (1997) Editorial de Construcción Arquitectónica. [Online]. [http://editorial.cda.ulpgc.es/estructuras/construccion/1\\_historia/11\\_prerromano/c1132.htm](http://editorial.cda.ulpgc.es/estructuras/construccion/1_historia/11_prerromano/c1132.htm)
- [25] J. Alberich and J. Carbonell, *Griegos y romanos*, F. O. Andrade, Ed. Palencia: Pearson, 1992.
- [26] I. J. Castillo Martínez de Olcoz, "El sentido de la luz: Ideas, mitos y evolución de las artes y los espectáculos de luz hasta el cine," Universidad de Barcelona Tesis Doctoral, 2005.
- [27] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, *Guía Técnica de Eficiencia Energética en Iluminación. Aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios*. Madrid: IDAE, 2005.
- [28] Soprintendenza speciale per i beni archologici di roma. (2012, Sep.) Il cantiere della Domus Aurea. Il progetto di rinascimento del complesso monumentale. [Online]. <http://archeoroma.beniculturali.it/cantieredomusaurea/>
- [29] J. De Isasa, *Historia de la Iglesia 1*. Madrid: Colección Flash, Ed. Acento, 1998.
- [30] O. Muñoz Heras, "Condiciones de iluminación natural en museos construidos en los años ochenta y noventa en España. La luz en los museos que vi nacer.," Tesis doctoral, 2006.
- [31] I. Ashdown. (2014, Mar.) All Things Lighting: Relevance in Illumination Engineering. [Online]. <http://agi32.com/blog/2014/03/05/daylight-factors/>
- [32] J. Rivera, *De re aedificatoria de Leon Batista Alberti*. Madrid: Akal, 1991.
- [33] I. J. Acosta García, "Luz cenital en la Arquitectura. Criterios de diseño de Lucernarios.," Tesis doctoral, 2012.
- [34] J. Ortiz y Sanz, *De Arquitectura de Andres Paladio, Vicentino*. Madrid: Imprenta Real, 1797.
- [35] Fondazione Memofonte. (1577) Fondazione Memofonte onlus Studio per l'elaborazione informatica delle fonti storico-artistiche. [Online]. <http://www.memofonte.it/trattati/carlo-borromeo-1538-1584.html>
- [36] J. Castex, *Renacimiento, barroco y clasicismo*. Madrid: Ediciones AKAL, 1994.
- [37] G. Guarini, *Architettura civile*. Torino, 1737.
- [38] F. Borsi, *Bernini*. Madrid: Ediciones AKAL, 1998.
- [39] G. Carlo Argan, *Borromini*. Madrid: Xarait, 1987.
- [40] I. Newton, *Opticks: or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*. London: William Innys, 1730.
- [41] H. Rosenau, *Boullée & visionary architecture, including Boullée's 'Architecture, Essay on Art'*. London: Academy Editions, 1976.
- [42] L. Benévolo, *Historia de la Arquitectura Moderna*, 7ª ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1996.
- [43] M.-A. Laugier, *Essai sur l'Architecture*. Paris: Duchesne, 1753.
- [44] M. Lopez-Fanjul, "Sir John Soane, arquitecto de colecciones, su casa-museo," *Museos.es*, pp. 122-129, 2007.

- [45] D. L. DiLaura, "Light's measure: A history of industrial photometry to 1909," *Leukos*, vol. 1, no. 3, pp. 75-149, 2005.
- [46] P. Littlefair, "Daylight, sunlight and solar gain in the urban environment," *Solar Energy*, vol. 70, no. 3, pp. 177-185, 2001.
- [47] J. Mardaljevic, "Daylighting and Compliance: Are current standards sufficient?," in *Daylight Simulation for design and compliance*, London, 2010.
- [48] United Kingdom Legislation, "Prescription Act, Chapter 71, Section 3: Claim to the use of light enjoyed for 20 years," Parliament of United Kingdom Ley de servidumbre, 1832.
- [49] R. Kerr, *On ancient lights and the evidence of surveyors thereon*. London: John Murray, 1865.
- [50] J. Mardaljevic and J. Christoffersen, "A roadmap for upgrading national/eu standards for daylight in buildings," in *Proceedings of CIE Centenary Conference "Towards a New Century of Light"*, Paris, 2013, pp. 178-187.
- [51] S. Kota and J. S. Haberl, "Historical survey of daylighting calculations methods and their use in energy performance simulations," in *Ninth International Conference for Enhanced Building Operations*, Austin, 2009.
- [52] D. Loe and R. McIntosh, "Learning from the last 100 years of illumination history," *Leukos*, vol. 6, no. 2, pp. 107-113, 2009.
- [53] F. Lloyd Wright, *An autobiography*. Warwick: Pomegranate Communications, Inc, 2005.
- [54] W. K. E. Osterhaus, "Office Lighting: A review of 80 years of Standards and Recommendations," in *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Toronto, 1993, p. 13.
- [55] L. Corbusier, "Vers une Architecture," *L'Esprit Nouveau*, 1920.
- [56] S. J. Rees, J. D. Spitler, M. G. Davies, and P. Haves, "Qualitative comparison of North American and U.K. cooling loads calculation methods," *International Journal of Heating, Ventilating, Air-Conditioning and Refrigeration Research*, vol. 6, no. 1, pp. 75-99, 2000.
- [57] M. Sánchez Arcas, "Sistemas prácticos de iluminación natural," *Hormigón y Acero*, no. 13, pp. 202-2013, 1935.
- [58] C. Vázquez, "La luz en la obra de Le Corbusier," *Revista ARQ*, no. 76, 2010.
- [59] E. Gunnar Asplund, "Our Architectonic concept of space," *International Architect*, vol. 1, no. 8, 1982.
- [60] M. Seidl, "Requirements for the daylighting of dwellings and work places- Standarization based on research," *Energy and Buildings*, no. 6, pp. 191-195, 1984.
- [61] L. Corbusier, "L'espace indicible," 1945.
- [62] R. G. Hopkinson, P. Petherbridge, and J. Longmore, *Daylighting*. London: Butterworth-Heinemann Ltd, 1966.
- [63] Commission Internationale de l'Eclairage, "CIE 016:1970. Daylight: International Recommendations for the Calculation of Natural Daylight," International Commission on Illumination CIE Publication ISBN 978 3 901906 66 4, 1970.
- [64] Parliament of the United Kingdom, "Rights of Light Act," Parlamento Británico Ley británica, 1959.
- [65] D. Van den Heuvel, A. M. Smithson, M. Risselada, P. Smithson, and B. Colomina, *Alison and Peter Smithson: From the House of the Future to a House of Today*. Rotterdam: O10 Publishers, 2004.
- [66] G. Schildt, *Alvar Aalto. Obra completa: arquitectura, arte y diseño*. Barcelona: Gustavo Gili, 1994.

- [67] L. Aya and Y. Bernal, "Premisas proyectuales en la obra de Álvaro Siza," *Grafías Disciplinarias de la UCP*, no. 15, pp. 49-58, 2011.
- [68] Danish Building Research Institute- Aalborg University, "Daylight Calculations in Practice: An investigation of the ability of nine daylight simulation programs to calculate the daylight factor in five typical rooms," Danish Building Research Institute, 2013.
- [69] International Energy Agency: Energy Conservation in Buildings & Community Systems, "Thermal and Solar Properties of Windows. Expert Guide," TNO Institute of Applied Physics, IEA ECBCS Annex 12: Windows and Fenestration, Delft, IEA report, 1987.
- [70] International Energy Agency: Solar Heating and Cooling Programme, "Simulation model validation using test cell data," Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, IEA SHC Task 8: Passive and Hybrid Solar Low Energy Buildings, Copenhagen, IEA report, 1986.
- [71] N. Ruck, et al., "Daylight in Buildings: A source on daylighting systems and components," International Energy Agency (IEA) Solar Heating and Cooling, Berkeley, IEA SHC Task 21 report LBNL-47493, 2000.
- [72] International Energy Agency: Solar Heating and Cooling Programme, "International survey about digital tools used by architects for solar design," IEA SHC Task 41 Solar Energy and Architecture. Subtask B: Methods and Tools for Solar Design, IEA SHC Report, 2011.
- [73] J. Navarro and J. J. Sendra, "Determination of the origin of the illumination vector due to vertical window under Monn-Spencer sky conditions (uniformly overcast)," *Renewable Energy*, no. 33, pp. 168-172, 2008.
- [74] J. Navarro, "Sobre iluminación natural en Arquitectura," Tesis doctoral ISBN: 87-7405-268-8, 1983.
- [75] J. Navarro and J. J. Sendra, "Daylighting provided by horizontal openings using the illumination vector," *Renewable Energy*, no. 31, pp. 2513-2523, 2006.
- [76] D. E. Fuller and A. McNeil. Radiance - A Validated Lighting Simulation Tool - Radsite. [Online]. <http://www.radiance-online.org/>
- [77] J. Mardaljevic, "Daylight simulation: validation, sky models and daylight coefficients," PhD thesis, Leicester, 2000.
- [78] Renzo Piano Building Workshop. Renzo Piano Building Workshop. [Online]. <http://www.rpbw.com/project/25/the-menil-collection/>
- [79] Ateliers Jean Nouvel. (2006, Feb.) Ateliers Jean Nouvel. [Online]. <http://www.jeannouvel.fr/>
- [80] P. Zumthor, *Atmósferas*. Gustavo Gili, 2006.
- [81] Campo Baeza. Alberto Campo Baeza. [Online]. <http://www.campobaeza.com>
- [82] A. Campo Baeza, "Arquitectura sine luce nulle architectura est," in *La idea construida. La arquitectura a la luz de las palabras*. Madrid: COAM, 1998.
- [83] E. Ng, et al., "Defining standard skies for Hong Kong," *Building and Environment*, vol. 42, pp. 866-876, 2007.
- [84] C. F. Reinhart. (2010, Apr.) Daysim3.0.Tutorial. [Online]. <http://daysim.com/pub/Daysim3.0.Tutorial.pdf>
- [85] J. A. Jakubiec and C. F. Reinhart, "Overview and Introduction to DAYSIM and Current Research Developments," in *Radiance Workshop 2012*, Copenhagen, 2012, p. 63.
- [86] DesignBuilder Software Ltd. DesignBuilder - Building design, simulation and visualisation. [Online]. <http://www.designbuilder.co.uk/>

- [87] Commission Internationale de l'Éclairage, "CIE S 011:2003. Spatial distribution of Daylight - CIE Standard General Sky," International Commission on Illumination Normativa, 2003.
- [88] C. F. Reinhart. Daysim. [Online]. <http://daysim.ning.com/>
- [89] Energy Efficiency and Renewable Energy- U.S. Department of Energy. Building Technologies Office. EnergyPlus: Energy Simulation Software. [Online]. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>
- [90] S. Darula and R. Kittler, "CIE General Sky Standard defining luminance distributions," in *Proceedings of eSim 2002*, Montreal, 2002.
- [91] R. Perez, R. Seals, and J. Michalsky, "All-weather model for sky luminance distribution-preliminary configuration and validation," *Solar Energy*, vol. 50, no. 3, pp. 235-245, 1993.
- [92] G. R. Newsham, "Lightswitch: A stochastic model for predicting office lighting energy consumption," in *3rd European Conference on Energy Efficient Lighting*, Newcastle (UK), 1995.
- [93] L. Heschong, "Daylighting and human performance," *ASHRAE Journal*, no. June 2002, pp. 65-67, 2002.
- [94] W. J. M. Bommel and G. J. Van den Beld, "Lighting for work: A review of visual and biological effects," *Lighting Research & Technology*, vol. 36, no. 4, pp. 255-269, 2004.
- [95] M. D. Egan, *Concepts in architectural lighting*. New York: McGraw Hill, 1983.
- [96] J. Mardaljevic. (2011) Climate-based Daylight Modelling. [Online]. <http://climate-based-daylighting.com/>
- [97] C. E. Ochoa, M. B. C. Aries, and J. L. M. Hensen, "State of the Art in Lighting Simulation for Building Science: A literature Review," *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 5, no. 4, pp. 209-233, 2012.
- [98] Energy Efficiency and Renewable Energy- U.S. Department of Energy. United States Department of Energy. [Online]. [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/)
- [99] Commission Internationale de l'Éclairage, "CIE 171:2006. Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs," International Commission on Illumination ISBN 978 3 901906 47 3, 2006.
- [100] International Energy Agency, "Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method," National Renewable Energy Laboratory, International Energy Agency -IEA, Golden, Colorado, IEA report, 1995.
- [101] J. M. Sancho Ávila, et al., "Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT," Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012.
- [102] T. Muneer, C. Gueymard, and H. Kambezidis, *Solar Radiation and Daylight Models for the energy efficient design of buildings*. Edinburg: Butterworth Heinemann, 2004.
- [103] Commission Internationale de l'Éclairage, "CIE S 017/E:2011 ILV: International lighting vocabulary," International Commission on Illumination CIE standard, 2011.
- [104] V. Badescu, *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent Advances*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [105] Natural Frequency. (1994) Archived Ecotect Resources - Community WIKI. [Online]. <http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Concepts>
- [106] P. Tregenza, *Desktop guide to daylighting for architects*. London: RIBA, 1998.
- [107] A. D. Galasiu and C. F. Reinhart, "Current daylighting design practice: a survey," *Building Research & Information*, vol. 36, no. 2, pp. 159-174, 2008.
- [108] C. Reinhart and A. Fitz, "Findings from a survey on the current use of daylight simulations in

- building design," *Energy and Buildings*, vol. 38, no. 7, pp. 824-835, 2006.
- [109] J. L. M. Hensen and R. Lamberts, *Building Performance Simulation for Design and Operation*. Taylor & Francis, 2011.
- [110] J. Mardaljevic, "Simulation of annual daylighting profiles for internal illuminances," *Lighting Research and Technology*, vol. 32, no. 3, pp. 111-118, 2000.
- [111] Commission Internationale de l'Eclairage. (1991) International Daylight Measurement Programme. [Online]. <http://idmp.entpe.fr/>
- [112] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, and R. Stewart, "Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance," *Solar Energy*, vol. 44, no. 5, pp. 271-289, 1990.
- [113] R. Perez, K. Webster, R. Seals, R. Stewart, and J. Barron, "Variations of the luminous efficacy of global and diffuse radiation and zenith luminance with weather conditions- Description of a potential method to generate key daylight availability data from existing solar radiation data bases," *Solar Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 33-44, 1987.
- [114] P. Littlefair, *Site layout planning for Daylight and Sunlight: A guide to good practice*. London: Building Research Establishment (BRE), 2011.
- [115] J. Mardaljevic, L. Hescong, and E. Lee, "Daylight metrics and energy savings," *Lighting Research and Technology*, vol. 41, pp. 261-283, 2009.
- [116] H. J. Bryan, "A simplified procedure for calculate the effects of daylight from clear skies," Lawrence Berkeley Laboratory, California, LBL project report, 1979.
- [117] J. Mardaljevic, "Climate-Based Daylight Analysis: Conclusion to Reportership R3-26," Comité Internacional de Iluminación Informe CIE, 2008.
- [118] A. Marsh, "The application of shading masks in building simulation," in *Ninth International IBPSA Conference*, Montréal, 2005, pp. 725-732.
- [119] British Standards Institution, "BS 8206-2: Lighting for buildings. Code of practice for daylighting," British Standards Institution Norma Británica ISBN 978 0 580 57793 2, 2008.
- [120] C. F. Reinhart and O. Walkenhorst, "Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds," *Energy and Buildings*, vol. 33, pp. 683-697, 2001.
- [121] J. Mardaljevic, "Daylighting Applications," in *Rendering with Radiance: A practical tool for global illumination. ACM Siggraph '98 Course#33*. Orlando, 1998, ch. 3, p. 129.
- [122] D. Bourgeois, C. F. Reinhart, and G. Ward, "A standard daylight coefficient model for dynamic daylighting simulations," *Building Research and Information*, vol. 36, no. 1, pp. 68-82, 2008.
- [123] C. F. Reinhart and S. Herkel, "The simulation of annual daylight illuminance distributions-- a state-of-the-art comparison of six RADIANCE-based methods," *Energy and Buildings*, vol. 32, pp. 167-187, 2000.
- [124] Collaborative for High Performance Schools, "Best Practices Manual. Volume II: Design," U.S. Department of Energy, 2006.
- [125] Hescong Mahone Group, "Daylight metrics: PIER Daylighting Plus Research Program," CEC-500-2012-053, 2012.
- [126] Illuminating Engineering Society of North America. Daylight Metrics Committee, "Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)," IES standard 978-0-87995-272-3, 2013.
- [127] C. F. Reinhart, "Lightswitch-2002: A model for manual and automated control of electric lighting and blinds," *Solar Energy*, vol. 71, no. 1, pp. 15-28, 2004.



- [128] A. Nabil and J. Mardaljevic, "Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors," *Energy and Buildings*, vol. 38, pp. 905-913, 2006.
- [129] Institute for Research Construction/ National Research Council Canada. (2003) Cost-effective Open-Plan Environments (COPE) Project. [Online]. <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/projects/irc/cope.html>
- [130] E. Vine, E. Lee, R. Clear, D. DiBartolomeo, and S. Selkowitz, "Office worker response to an automated venetian blind and electric lighting systems: a pilot study," *Energy and Buildings*, vol. 28, pp. 205-218, 1998.
- [131] P. J. Littlefair, "Predicting annual lighting use in daylit buildings," *Building and Environment*, vol. 25, no. 1, pp. 43-53, 1990.
- [132] J. Mardaljevic, M. Andersen, N. Roy, and J. Christoffersen, "Daylighting metrics: Is there a relation between useful daylight illuminance and daylight glare probability?," in *Proceedings of the Building Simulation and Optimization Conference BSO12*, Loughborough, UK, 2012, p. 8.
- [133] E. Cuce and S. B. Riffat, "A state-of-the-art review on innovative glazing technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 41, pp. 695-714, 2015.
- [134] H. Bülow-Hübe, "Energy-efficient window systems: Effects of energy use and daylight in buildings," PhD, Department of Construction and Architecture, Lund University, Lund, 2001.
- [135] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, *ASHRAE Handbook: Fundamentals*. Atlanta: ASHRAE, 2009.
- [136] IBPSA -USA affiliate. (2012) BEMbook. [Online]. <http://www.bembook.ibpsa.us/>
- [137] Ministerio de Fomento, "Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE "Ahorro de Energía", del Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo," Ministerio de Fomento Normativa de Obligado Cumplimiento, 2013.
- [138] J. Sornay, "Recent developments of building energy simulation tools in Europe," in *Building Simulation International Conference*, Seattle, 1985, pp. 15-22.
- [139] T. Kusuda, "Summary of recent activities on building energy simulation analysis in North America," in *Building Simulation International Conference*, Seattle, 1985, pp. 1-14.
- [140] J. Hensen. (2009) 7S410 - Introduction to building performance simulation. [Online]. <http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/courseware/TUe-7S410/7s410.htm>
- [141] C. F. Reinhart and D. I. Ibarra, "Daylight factor simulations - How close do simulation begginer 'really' get?," in *Eleventh International IBPSA Conference*, Glasgow, 2009, pp. 196-203.
- [142] C. Morbitzer and P. Strachan, "Integration of building simulation into the design process of an architecture practice," in *Seventh International IBPSA Conference*, Rio de Janeiro, 2001, pp. 697-704.
- [143] J. J. Sendra Salas, et al., *Proyecto Eficacia: Optimización energética en la vivienda colectiva*. Sevilla, España: Emvisesa, Sodinur y Universidad de Sevilla, 2011.
- [144] X. Shi and W. Yang, "Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects," *Automation in Construction*, no. 32, pp. 125-135, 2013.
- [145] J. M. Estes, S. Schreppler, and T. Newsom, "Daylighting prediction software: comparative analysis and application," in *Fourteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates*, Tyler (Texas, USA), 2004, pp. 259-267.
- [146] S. C. M. Hui, "Effective use of building energy simulation for enhancing building energy codes," in *Eighth International IBPSA Conference*, Eindhoven, 2003, pp. 532-530.
- [147] A. Marsh, "A computational approach to regulatory compliance," in *Ninth International IBPSA*

- Conference*, Montréal, 2005, pp. 717-724.
- [148] C. F. Reinhart and M. Morrison, "The Lightswitch Wizard - reliable daylight simulations for initial design investigation," in *Eighth International IBPSA Conference*, Eindhoven, 2003.
- [149] P. de Wielede, G. Augenbroe, and M. van der Voorden, "Invocation of building simulation tools in building design practice," in *Sixth International IBPSA Conference*, Kyoto, 1999.
- [150] M. Donn, S. Selkowitz, and B. Bordass, "Simulation in the service of design - asking the right questions," in *Eleventh International IBPSA Conference*, Glasgow, 2009, pp. 1314-1321.
- [151] L. B. McElroy, J. W. Hand, and P. A. Strachan, "Experience from a design advice service using simulation," in *Fifth International IBPSA Conference*, Prague, 1997.
- [152] E. J. Glassman and C. F. Reinhart, "Façade optimization using parametric design and future climate scenarios," in *Thirteenth International IBPSA Conference*, Chambéry, 2013, pp. 1585-1592.
- [153] R. Venancio, A. Pedrini, A. C. van der Linden, E. van den Ham, and R. Stouffs, "Understanding envelope design: Survey about architectural practice and building performance," in *Twelfth International IBPSA Conference*, Sydney, 2011, pp. 514-521.
- [154] E. Ng, K.-P. Lam, and W. Wu, "The application of computer simulation techniques to the design and preservation of a national monument," in *Sixth International IBPSA Conference*, Kyoto, 1999.
- [155] A. Marsh, "Computer-optimised shading design," in *Eighth International IBPSA Conference*, Eindhoven, 2003.
- [156] J. A. Sargent, J. Niemasz, and C. F. Reinhart, "SHADERADE: Combining Rhinoceros and EnergyPlus for the design of static exterior shading devices," in *Twelfth International IBPSA Conference*, Sydney, 2011, pp. 310-317.
- [157] M. R. Donn, "A survey of users of thermal simulation programs," in *Fifth International IBPSA Conference*, Prague, 1997.
- [158] A. Mahdavi, S. Feurer, A. Redlein, and G. Suter, "An inquiry into the building performance simulation tools usage by architects in Austria," in *Eighth International IPSA Conference*, Eindhoven, 2003, pp. 777-784.
- [159] F. Maarami and M. Fontoynt, "Analytical tests for investigating the accuracy of lighting programs," *Lighting Research and Technology*, vol. 35, no. 3, pp. 225-242, 2003.
- [160] C. Reinhart and P.-F. Breton, "Experimental validation of Autodesk (r) 3Ds Max (r) Design 2009 and Daysim 3.0," *Leukas*, vol. 6, no. 1, pp. 7-35, 2009.
- [161] J. Osborne, "Building a comprehensive dataset for the validation of daylight simulation software, using complex 'real architecture'," Master Thesis, Centre for Building Performance Research, Victoria University of Wellington School of Architecture and Design, Wellington, 2012.
- [162] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, "Standard 140-2011 - Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs," ASHRAE American National Standard, 2011.
- [163] G. Guyon, "Role of the thermal user in results obtained from simulation software programs," in *Fifth International IBPSA Conference*, Prague, 1997.
- [164] J. Hand, J. A. Clarke, and P. Strachan, "Deployment of simulation within design practice," in *Sixth International IBPSA Conference*, Kyoto, 1999.
- [165] P. de Wielede, "The gap between predicted and measured energy performance of building: a framework for investigation," *Automation in Construction*, vol. 41, pp. 40-49, 2014.
- [166] M. N. Inanici, "Application of the State-of-the-art computer simulation and visualization in

- architectural lighting research," in *Seventh International IBPSA Conference*, Rio de Janeiro, 2001, pp. 1175-1182.
- [167] A. Tsangrassoulis and V. Bourdakis, "Comparison of radiosity and ray-tracing techniques with a practical design procedure for the prediction of daylight levels in atria," *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 2157-2162, 2003.
- [168] R. Ortiz Cebolla, "Caracterización de los intercambios radiantes en recintos por el método "Backward Ray Tracing". Aplicación a los entornos urbanos y a la iluminación natural," Proyecto Fin de Carrera, 2004.
- [169] P. R. Tregenza, "The Monte Carlo Method in Lighting Calculations," *Lighting Research and Technology*, vol. 15, no. 4, pp. 163-170, 1983.
- [170] C. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert, and B. T. Griffith, "Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs," *Building and Environment*, no. 43, pp. 661-673, 2008.
- [171] M. S. de Wit, "Uncertainty analysis in building thermal modelling," in *Fourth International IBPSA Conference*, Madison, 1995, pp. 324-330.
- [172] R. D. Judkoff, "Validation of Building Energy Analysis Simulation Programs at the Solar Energy Research Institute," *Energy and Buildings*, no. 10, pp. 221-239, 1988.
- [173] P. A. Strachan, G. Kokogiannakis, and I. A. MacDonald, "History and development of validation with the ESP-r simulation program," *Building and Environment*, no. 43, pp. 601-609, 2008.
- [174] J. Mardaljevic, "Verification of program accuracy for illuminance modelling: assumptions, methodology and an examination of conflicting findings," *Lighting Research and Technology*, vol. 36, no. 3, pp. 217-242, 2004.
- [175] S. Hayman, "Daylight measurement error," *Lighting Research and Technology*, vol. 35, no. 2, pp. 101-110, 2003.
- [176] J. W. Hand, D. B. Crawley, M. Donn, and L. K. Lawrie, "Improving the data available to simulation programs," in *Ninth International IBPSA Conference*, Montréal, 2005, pp. 373-380.
- [177] A. B. Khodulev and E. A. Kopylov. (1996) Keldysh Institute of Applied Mathematics. [Online]. [www.keldysh.ru/pages/cgraph/articles/pals/index.htm](http://www.keldysh.ru/pages/cgraph/articles/pals/index.htm)
- [178] T. E. Bou-Saada and J. S. Haberl, "An improved procedure for developing calibrated hourly simulation models," in *Fourth International IBPSA Conference*, Madison, 1995, pp. 475-484.
- [179] I. A. McDonald, J. A. Clarke, and P. A. Strachan, "Assessing uncertainty in building simulation," in *Sixth International IBPSA Conference*, Kyoto, 1999.
- [180] A. Thanachareonkit, J. -L. Scartezzini, and M. Andersen, "Comparing daylighting performance assessment of buildings in scale models and test modules," *Solar Energy*, vol. 79, no. 2, pp. 168-182, 2005.
- [181] M. E. McCabe, J. Lecourte, and S. Robinson, "Calorimetric Test Facility for field measuring thermal performance of passive/hybrid solar components," U.S. Department of Energy, 1982.
- [182] T. Noguchi, "Summary of Solar Energy R&D Projects," Solar Research Laboratory, Nagoya (Japan), IEA-SHC Programme report, 1984.
- [183] International Energy Agency: Energy Conservation in Buildings & Community Systems, "Comparison of six simulation codes: DEROB, DYWON, PASSIM, DOE-2.1C, SERI-RES, HELIOS1," EMPA, Section Building Physics, IEA ECBCS Annex 12: Windows and Fenestration, Dübendorf, IEA report, 1987.
- [184] D. Bloomfield, et al., "New techniques for validating building energy simulation programs," in

- Fourth International IBPSA Conference*, Madison, 1995, pp. 596-603.
- [185] F. C. Winkelmann, "Modeling windows in EnergyPlus," in *Seventh International IBPSA Conference*, Rio de Janeiro, 2001, pp. 457-464.
- [186] B. A. Lomanowski and J. L. Wright, "Modeling fenestration with shading devices in building energy simulation: a practical approach," in *Eleventh International IBPSA Conference*, Glasgow, 2009, pp. 976-983.
- [187] M. J. Holtz and D. N. Wortman, "A summary of building energy analysis and design tool evaluation results from IEA Task VIII," in *First International IBPSA Conference*, Vancouver, 1989, pp. 232-239.
- [188] S. Ø. Jensen, "Validation of building energy simulation programs: a methodology," *Energy and Buildings*, vol. 22, pp. 133-144, 1995.
- [189] P. Wouters, L. Vandaele, P. Voit, and N. Fisch, "The Use of Outdoor Test Cells for Thermal and Solar Building Research within the PASSYS Project," *Building and Environment*, vol. 28, no. 2, pp. 107-113, 1993.
- [190] S. Østergaard Jensen and R. van de Perre, "Tools for Whole Model Validation of Building Simulation Programs Experience from the CEC Concerted Action PASSYS," in *Second International IBPSA Conference*, Nice, 1991, pp. 547-552.
- [191] M. Shea and G. Pellegrini, "Calibration and testing methodology for a passive solar test cell," Commission of the European Communities Informe técnico, 1985.
- [192] E. M. Ryan and T. F. Sanquist, "Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions," *Energy and Buildings*, no. 47, pp. 375-382, 2012.
- [193] J. A. Clarke, P. Strachan, and C. Pernot, "An approach to the calibration of building energy simulation models," *ASHRAE Transactions*, vol. 99, no. 2, pp. 917-927, 1993.
- [194] G. Guyon, S. Moinard, and N. Ramdani, "Empirical validation of building energy analysis tools by using test carried out in small cells," in *Sixth International IBPSA Conference*, Kyoto, 1999.
- [195] R. Lollini, L. Danza, and I. Meroni, "Energy efficiency of a dynamic glazing system," *Solar Energy*, no. 84, pp. 526-537, 2010.
- [196] J. Mardaljevic, "The BRE-IDMP dataset: a new benchmark for the validation of illuminance predictions techniques," *Lighting Research and Technology*, vol. 33, no. 2, pp. 117-136, 2001.
- [197] R. Judkoff and J. Neymark, "Model Validation and Testing: The methodological foundation of ASHRAE Standard 140," in *ASHRAE 2006 Annual Meeting*, Quebec, 2006, p. 15.
- [198] S. Attia, L. Beltrán, A. De Herde, and J. Hensen, "'Architect friendly': a comparison of ten different building performance simulation tools," in *Eleventh International IBPSA*, Glasgow, 2009, pp. 204-211.
- [199] R. Judkoff and J. Neymark, "Twenty years on!: Updating the IEA BESTEST building thermal fabric test cases for ASHRAE Standard 140," in *Thirteenth International IBPSA Conference*, Chambéry, 2013, pp. 63-70.
- [200] P. G. Loutzenhiser, H. Manz, C. Felsmann, P. A. Strachan, and G. M. Maxwell, "An empirical validation of modeling solar gain through a glazing unit with external and internal shading screens," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 528-538, 2007.
- [201] P. G. Loutzenhiser, H. Manz, S. Carl, H. Simmler, and G. M. Maxwell, "Empirical validations of solar gain models for a glazing unit with exterior and interior assemblies," *Energy and Buildings*, no. 40, pp. 330-340, 2008.
- [202] P. G. Loutzenhiser, H. Manz, S. Moosberger, and G. M. Maxwell, "An empirical validation of window solar gain models and the associated interactions," *International Journal of Thermal*

- Sciences*, no. 48, pp. 85-95, 2009.
- [203] R. Yao, N. Baker, and M. McEvoy, "A simplified method for referring the energy and overheating performance of window design," *Architectural Science Review*, vol. 46, no. 3, pp. 225-231, 2003.
- [204] M. Fontoynt, et al., "IEA SHC Task 21/ECBS Annex 29: Validation of daylighting computer programs," International Energy Agency, 1999.
- [205] C. Aghemo, A. Pellegrino, and V. R. M. Lo Verso, "The approach to daylighting by scale models and sun and sky simulators: A case study for different shading systems," *Building and Environment*, no. 43, pp. 917-927, 2008.
- [206] M. S. Ubbelohde and C. Humman, "Comparative evaluation of four daylighting software programs," in *Proceedings of the 1998 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, Berkeley, CA, USA, 1999, pp. 3325-3340.
- [207] J. Ashmore and P. Richens, "Computer simulation in daylight design: a comparison.," *Architectural Science Review*, no. 44, pp. 33-44, 2001.
- [208] I. Acosta, J. Navarro, and J. J. Sendra, "Towards an Analysis of Daylighting Simulation Software," *Energies*, vol. 4, no. 7, pp. 1010-1024, 2011.
- [209] I. Acosta, C. M. Muñoz, P. M. Esquivias, D. Moreno, and J. Navarro, "Analysis of the accuracy of the sky component calculation in daylighting simulation programs," *Solar Energy*, vol. 119, pp. 54-67, 2015.
- [210] A. D. Galasiu and M. R. Atif, "Applicability of daylighting computer modeling in real case studies: comparison between measured and simulated daylight availability and lighting consumption," *Building and Environment*, vol. 37, no. 4, pp. 363-377, 2002.
- [211] E. Ng, "A study of the Accuracy of Daylighting Simulation of Heavily obstructed Buildings in Hong Kong," in *Seventh International IBPSA Conference*, Rio de Janeiro, 2001, pp. 1215-1222.
- [212] J. Mardaljevic, "Validation of a lighting simulation program under real sky conditions," *Lighting Research and Technology*, no. 27, pp. 181-188, 1995.
- [213] C. E. Ochoa and I. G. Capeluto, "Evaluating visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates," *Building and Environment*, vol. 41, no. 8, pp. 1128-1135, 2006.
- [214] K. Chang-Sung and C. Seung-Jin, "Daylighting simulation as an architectural design process in museums installed with toplights," *Building and Environment*, vol. 46, pp. 201-222, 2011.
- [215] D. E. Christakou and C. N. D. Amorim, "Daylighting simulation: Comparison of softwares for architect's utilization," in *Ninth International IBPSA*, Montréal, 2005, pp. 183-190.
- [216] International Energy Agency: Solar Heating and Cooling Programme, "Application of the CIE test cases to assess the accuracy of lighting computer programs," École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE), IEA SHC Task 31/IEA ECBCS Annex 29: Daylighting Buildings in the 21st Century, Lyon, IEA SHC Report, 2005.
- [217] M. Donn, D. Xu, D. Harrison, and F. Maarami, "Using simulation software calibration tests as a consumer guide - A feasibility study using lighting simulation software," in *Tenth International IBPSA Conference*, Beijing, 2007, pp. 1999-2006.
- [218] R. Labayrade, M. Fontoynt, C. Mouret, P. Avouac, and M. C. Jean, "Assessment of Velux Daylight Visualizer 2 Against CIE 171:2006 Test Cases," Ecole Nationale Des Travaux Publics de l'Etat, 2009.
- [219] M. Fontoynt, D. Larsen, L. Andersen, and M. Grün-Roien, "Proposal of simple daylighting performance indices for regulations: validation with on-site measurement campaign," in *Proceedings of CIE Centenary Conference "Towards a New Century of Light"*, Paris, 2013, pp.

831-837.

- [220] J. Mardaljevic, "Rethinking daylighting and compliance," *Journal of Sustainable Engineering Design*, vol. 1, no. 3, pp. 1-9, 2013, <http://arrow.dit.ie/sdar/vol1/iss3/1>.
- [221] Y. Koga and Y. Miki, "A review of historical changes in Japanese regulations and standards for sunlight and daylighting," in *Proceedings of CIE Centenary Conference "Towards a New Century of Light"*, Paris, 2013, pp. 793-800.
- [222] European Committee for Standardization, "EN 62471: Photobiological safety of lamps and lamp systems," European Standard, 2008.
- [223] S. M. Berman, "A new retinal photoreceptor should affect lighting practice," *Lighting Research & Technology*, no. 40, pp. 373-376, 2008.
- [224] J. Mardaljevic and J. Christoffersen, "'Climate connectivity' in the daylight factor basis of building standards," *Building and Environment*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.009>, 2016.
- [225] C. F. Reinhart and V. R. M. LoVerso, "A rules of thumb-based design sequence for diffuse daylight," *Lighting Research & Technology*, vol. 42, pp. 7-31, 2010.
- [226] N. Lukman, N. Ibrahim, S. Hayman, and R. Hyde, "Rule of Thumb for Daylighting of Rooms with External Obstructions," *Architectural Science Review*, vol. 52, no. 2, pp. 151-160, 2009.
- [227] Ayuntamiento de Sevilla, *Normas Urbanísticas del Plan General de Ordenación Urbana*. Sevilla: Gerencia de Urbanismo, 2006, <http://www.pgou.eu/Sevilla.htm>.
- [228] D. Givan, "Edinburgh planning guidance," Edimburg Government Guía técnica, 2010.
- [229] C. F. Reinhart, "A simulation-based review of the ubiquitous window-head-height to daylight zone depth rule-of-thumb," in *Ninth International IBPSA Conference*, Montréal, 2005, pp. 1-8.
- [230] M. Martín Monroy, *Manual de Diseño ICARO. Manual de la iluminación*. Las Palmas de Gran Canaria: Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria, 2006.
- [231] European Committee for Standardization, "EN 12464-1: Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places," European Standard ISBN 978 0 580 68495 1, 2012.
- [232] European Committee for Standardization, "EN 15193: Energy performance of buildings - energy requirements for lighting. Incorporating corrigendum.," European Standard, 2008/2010.
- [233] European Committee for Standardization, "EN 12665: Light and lighting - Basic terms and criteria for specifying lighting requirements," European Standard, 2002.
- [234] European Committee for Standardization, "EN 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics," European Standard, 2008.
- [235] P. Chynoweth, "Progressing the rights to light debate - Part 1: a review of current practice," *Estructural survey*, vol. 22, no. 3, pp. 131-137, 2004.
- [236] D. Strong. (2013, May) The Daylight Site. [Online]. <http://thedaylightsite.com/syposium/2013-2/presentations/>
- [237] M. Boubreki, "A overview of the current state of Daylight Legislation," *Journal of the Human-Environmental System*, vol. 7, no. 2, pp. 57-63, 2004.
- [238] International Energy Agency: Energy Conservation in Buildings & Community Systems, "Building regulations, Standards and Codes concerning Thermal and Solar Performance of Windows; a survey of eight countries," TNO Institute of Applied Physics, IEA ECBCS Annex 12: Windows and Fenestration, Delft, IEA report, 1986.
- [239] C. Martinsons, "Role of daylight in the existent and future French building regulations," in *3rd*

*VELUX Daylight Symposium*, Rotterdam, 2009.

- [240] Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, "Orden de 1 de marzo de 2013, por la que se aprueban las Normas Directoras para la Ordenación Urbanística en desarrollo de los artículos 4 y 5 del Decreto 2/2012, de 10 de enero, por el que se regula el régimen de edificaciones y asentamientos existentes e," Norma Andaluza, 2013.
- [241] Ministerio de Vivienda, "Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación," Norma Española, 2006.
- [242] A. L. Schmid, "Daylighting and isolation in high density urban zones: How simulation supported a new law in Curitiba," in *Seventh International IBPSA Conference*, Rio de Janeiro, 2001, pp. 1093-1100.
- [243] R. Fayaz and B. M. Kari, "Comparison of energy conservation building codes of Iran, Turkey, Germany, China, ISO 9164 and EN 832," *Applied Energy*, no. 86, pp. 1949-1955, 2009.
- [244] European Parliament and the Council of the European Union, "Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings (EPBD recast)," European Parliament and the Council of the European Union, 2010.
- [245] European Parliament and Council, "Directive 2002/91/CE on the energy performance of buildings (EPBD)," European Parliament and Council European Directive, 2002.
- [246] Ministerio de Presidencia, "Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios," Ministerio de Presidencia Normativa de Obligado Cumplimiento, 2013.
- [247] S. Chirattananon, P. Chaiwivatworakul, V. D. Hien, P. Rakkwamsuk, and K. Kubaha, "Assessment of energy savings from the revised building energy code of Thailand," *Energy*, no. 35, pp. 1741-1753, 2010.
- [248] A. N. Ahmed, M. M. Samaan, O. M. A. Farag, and A. S. El Aishy, "Using simulation tools for enhancing residential buildings energy code in Egypt," in *Twelfth International IBPSA Conference*, Sydney, 2011, pp. 1141-1148.
- [249] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, "Standard 189.1 - Design of High-Performance Green Buildings Except Low-Rise Residential Buildings," ASHRAE American National Standard, 2009.
- [250] M. Andersen, J. Mardaljevic, and S. Lockley, "A framework for predicting the non-visual effects of daylight - Part I: photobiology-based model," *Lighting Research and Technology*, no. 44, pp. 37-53, 2012.
- [251] D. H. W. Li, "A review of daylight illuminance determinations and energy implications," *Applied Energy*, no. 87, pp. 2109-2118, 2010.
- [252] G. D. Ander, *Daylighting performance and design*, 1<sup>st</sup> ed. London: Van Nostrand Reinhold, 1995.
- [253] E. Gratia and A. De Herde, "Design of low energy office buildings," *Energy and Buildings*, no. 35, pp. 473-491, 2003.
- [254] J. Page, "First conference on measurement and modeling of solar radiation and daylight "Challenges for the 21st Century" Napier University, Edinburgh, 15-16 September 2003," *Energy*, no. 30, pp. 1501-1515, 2005.
- [255] A. Aksamija, *Sustainable Facades: Design Methods for High-Performance Building Envelopes*. Wiley, 2013.
- [256] E. Ne'eman, "Daylight availability database for energy efficient integration with electric light," *Journal of the Illuminating Engineering Society*, vol. 27, no. 2, pp. 59-66, 1998.

- [257] S. Kleindienst, M. Bodart, and M. Andersen, "Graphical representation of climate-based daylight performance to support architectural design," *Leukos*, vol. 5, no. 1, pp. 39-61, 2008.
- [258] D. H. W. Li, T. N. T. Lam, and V. W. C. Chu, "Relationship between the total solar radiation on tilted surfaces and the sunshine hours in Hong Kong," *Solar Energy*, vol. 82, pp. 1220-1228, 2008.
- [259] D. Dumortier, "Daylight availability in Lyon," National Engineering School of State Public Works -ENTPE, 1997.
- [260] M. Navvab, M. Karayel, E. Ne'eman, and S. Selkowitz, "Daylight availability data for San Francisco," *Energy and Buildings*, no. 6, pp. 273-281, 1984.
- [261] B. Hasdemir, "Daylight availability in Turkey," *Energy and Buildings*, no. 6, pp. 267-272, 1984.
- [262] L. Robledo and A. Soler, "Luminous efficacy of direct solar radiation for all sky types," *Energy*, no. 26, pp. 669-677, 2001.
- [263] J. C. Lam and D. H. W. Li, "Luminous efficacy of daylight under different sky conditions," *Energy conversion & management*, vol. 37, no. 12, pp. 1703-1711, 1996.
- [264] M. Cucumo, A. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, and V. Marinelli, "Correlations of global and diffuse solar luminous efficacy for all sky conditions and comparisons with experimental data of five localities," *Renewable energy*, no. 33, pp. 2036-2047, 2008.
- [265] M. S. Mayhoub and D. J. Carter, "A model to estimate direct luminous efficacy based on satellite data," *Solar Energy*, no. 85, pp. 234-248, 2011.
- [266] R. Perez and R. Seals, "Evaluation of daylight availability conversion models at the Albany IDMP station," in *Proceedings of the American Solar Energy Society*, San Jose, 1994, p. 7.
- [267] S. L. Wong, K. K. W. Wan, D. H. W. Li, and J. C. Lam, "Generation of typical weather years with identified standard skies for Hong Kong," *Building and Environment*, no. 56, pp. 321-328, 2012.
- [268] D. Dumortier and F. Van Roy, "Daylighting information throughout Europe using the Satel-Light and Soda internet servers," National Engineering School of State Public Works -ENTPE, 2000.
- [269] A. Hammer, D. Heinemann, A. Westernhellweg, H. G. Beyer, and C. Reise, "Daylight and solar irradiance data derived from satellite observations - The Satel-Light project," in *Proceedings of the 9th Conference on satellite meteorology and oceanography*, Paris, 1998, pp. 747-750.
- [270] M. Fontoynt, et al., "Satel-Light: a European Programme dedicated to serving daylight data computed from Meteosat images," National Engineering School of State Public Works -ENTPE, 1997.
- [271] Centre for Energy and Environment, "Weather files for current and future climate," College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences. University of Exeter LCHS, 2011.
- [272] D. B. Crawley and Y. J. Huang, "Does it matter which weather data you use in energy simulations?," *Building Energy Simulation User News*, vol. 18, no. 1, pp. 1-11, 1997.
- [273] D. B. Crawley, J. W. Hand, and L. K. Lawrie, "Improving the weather information available to simulation programs," in *Proceedings of Building Simulation '99*, Kyoto, Japan, 1999, pp. 529-536.
- [274] A. Iversen, S. Svendsen, and T. R. Nielsen, "The effect of different weather data sets and their resolution in climate-based daylight modelling," *Lighting Research and Technology*, no. 45, pp. 305-316, 2013.
- [275] L. Yang, J. C. Lam, J. Liu, and C. L. Tsang, "Building energy simulation using multi-years and typical meteorological years in different climates," *Energy conversion and management*, no. 49, pp. 113-124, 2008.



- [276] T. A. Morton, P. Bretschneider, D. Coley, and T. Kershaw, "Building a better future: An exploration of beliefs about climate change and perceived need for adaptation within the building industry," *Building and Environment*, no. 46, pp. 1151-1158, 2011.
- [277] C. F. Reinhart, "Effects of office design on the annual daylight availability -a simulation study," National Research Council Canada The COPE (Cost-effective Open Plan Environments) Consortium, 2001.
- [278] H. Shen and A. Tzempelikos, "A parametric analysis for the impact of façade design options on the daylighting performance of office spaces," in *International High Performance Buildings Conference*, Purdue (Indiana, USA), 2010.
- [279] C. M. Munoz, P. M. Esquivias, D. Rangel, I. Acosta, and J. Navarro, "Climate-based daylighting analysis for the effects of location, orientation and obstruction," *Lighting Research and Technology*, no. 46, pp. 268-280, 2014.
- [280] G. Manioglu and Z. Yilmaz, "Energy efficient design strategies in the hot dry area of Turkey," *Building and Environment*, vol. 43, pp. 1301-1309, 2008.
- [281] A. Iversen, T. R. Nielsen, and S. H. Svendsen, "Illuminance Level in the Urban Fabric and in the Room," *Indoor and Built Environment*, vol. 20, no. 4, pp. 456-463, 2011.
- [282] D. H. W. Li, S. L. Wong, C. L. Tsang, and G. H. W. Cheung, "A study the daylighting performance and energy use in heavily obstructed residential buildings via computer simulation techniques," *Energy and buildings*, vol. 38, pp. 1343-1348, 2006.
- [283] G. Lobaccaro and F. Frontini, "Solar energy in urban environment: how urban densification affects existing buildings," *Energy Procedia*, no. 48, pp. 1559-1569, 2014.
- [284] N. A. Mesa, L. Corica, and A. Pattini, "Evaluation of the potential of natural light to illuminate buildings in dense urban environment. a study in Mendoza, Argentina," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2414-2423, 2011.
- [285] D. H. W. Li and S. L. Wong, "Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings," *Applied Energy*, no. 84, pp. 1199-1209, 2007.
- [286] D. H. W. Li, G. H. W. Cheung, K. L. Cheung, and J. C. Lam, "Simple method for determining daylight illuminance in a heavy obstructed environment," *Building and Environment*, vol. 44, pp. 1074-1080, 2009.
- [287] J. Stromann-Andersen and P. A. Sattrup, "The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains," *Energy and buildings*, vol. 43, pp. 2011-2020, 2011.
- [288] F. Faizi, N. Noorani, A. Ghaedi, and M. Mahdavinejad, "Design an Optimun pattern of orientation in residential complexes by analyzing the level of energy consumption. Case study: Maskan Mehr Complexes, Tehran, Iran.," *Procedia Engineering*, vol. 21, pp. 1179-1187, 2011.
- [289] J. Morrissey, T. Moore, and R. E. Horne, "Affordable passive solar design in a temperate climate: An experiment in residential building orientation," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 568-577, 2011.
- [290] M. Shahrestani, R. Yao, Z. Luo, E. Turkbeyler, and H. Davies, "A field study of urban microclimates in London," *Renewable energy*, no. 73, pp. 3-9, 2015.
- [291] D. Lai, et al., "Outdoor space quality: A field study in an urban residential community in central China," *Energy and Buildings*, no. 68, pp. 713-720, 2014.
- [292] J. J. Sarralde, D. J. Quinn, D. Wiesmann, and K. Steemers, "Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London," *Renewable energy*, no. 73, pp. 10-17, 2015.
- [293] S. Freitas, C. Catita, P. Redweik, and M. C. Brito, "Modelling solar potential in the urban

- environment: State-of-the-art review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 41, pp. 915-931, 2015.
- [294] H. Sanaieian, M. Tenpierik, K. van den Linden, F. M. Seraj, and S. M. M. Shemrani, "Review of the impact of urban block form on thermal performance, solar access and ventilation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 38, pp. 551-560, 2014.
- [295] P. Steadman, I. Hamilton, and S. Evans, "Energy and urban form: an empirical and statistical approach," *Building Research & Information*, vol. 42, no. 1, pp. 17-31, 2014.
- [296] D. H. W. Li and E. K. W. Tsang, "An analysis of daylighting performance for office buildings in Hong Kong," *Building and Environment*, vol. 43, pp. 1446-1458, 2008.
- [297] D. H. W. Li and J. C. Lam, "Measurements of solar radiation and illuminance on vertical surfaces and daylighting implications," *Renewable energy*, no. 20, pp. 389-404, 2000.
- [298] R. Pacheco, J. Ordóñez, and G. Martínez, "Energy efficient design of building: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 16, pp. 3559-3573, 2012.
- [299] K. J. Kontoleon, "Dynamic thermal circuit modelling with distribution of internal solar radiation on varying façade orientations," *Energy and Buildings*, no. 47, pp. 139-150, 2012.
- [300] E. Shaviv, "The influence of the orientation of the main solar glazing on the total energy consumption of a building," *Solar Energy*, no. 26, pp. 453-454, 1981.
- [301] J. A. Jakubiec. (2014) DIVA Day 2014 - DIVA for Rhino. [Online]. <http://diva4rhino.com/diva-day-2014>
- [302] M. C. Dubois and K. Flodberg, "Daylight utilisation in perimeter office rooms at high latitudes: Investigation by computer simulation," *Lighting Research and Technology*, no. 45, pp. 52-75, 2013.
- [303] J. Diepens, F. Bakker, and L. Zonneveldt. (2000) Daylight Design Variations Book. [Online]. <http://sts.bwk.tue.nl/daylight/varbook/index.htm>
- [304] B. P. Jelle, et al., "Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, no. 96, pp. 1-28, 2012.
- [305] M. T. Araji and M. Boubekri, "Window sizing procedures based on vertical illuminance and degree of discomfort glare in buildings interiors," *Architectural Science Review*, vol. 51, no. 3, pp. 252-262, 2008.
- [306] H. Bülow-Hübe, "Daylight in glazed office buildings: A comparative study of daylight distribution, luminance and illuminance distribution for an office room with three different glass areas," Lund University, 2008.
- [307] M. Thalfeldt, E. Pikas, J. Kurnitski, and H. Voll, "Façade design principles for nearly zero energy buildings in a cold climate," *Energy and Buildings*, no. 67, pp. 309-321, 2013.
- [308] R. Ünver, L. Öztürk, S. Adigüzel, and Ö. Çelik, "Effect of the facade alternatives on the daylight illuminance in offices," *Energy and Buildings*, no. 35, pp. 737-746, 2003.
- [309] C. E. Ochoa, M. B. C. Aries, E. J. van Loenen, and J. L. M. Hensen, "Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort," *Applied Energy*, vol. 95, pp. 238-245, 2012.
- [310] P. Boyce, C. Hunter, and O. Howlett, "The benefits of daylight through windows," Lighting Research Center, 2003.
- [311] S. Grynning, A. Gustavsen, B. Time, and B. P. Jelle, "Windows in the buildings of tomorrow: Energy losers or energy gainers?," *Energy and Buildings*, no. 61, pp. 185-192, 2013.
- [312] J. W. Lee, H. J. Jung, J. Y. Park, J. B. Lee, and Y. Yoon, "Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements," *Renewable*

- Energy*, no. 50, pp. 522-531, 2013.
- [313] W. J. Hee, et al., "The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 42, pp. 323-343, 2015.
- [314] R. M. J. Bokel, "The effect of window position and window size on the energy demand for heating, cooling and electric lighting," in *Tenth International IBPSA Conference*, Beijing, 2007, pp. 117-121. [Online]. <a href="http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p542\_final.pdf">http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p542\_final.pdf</a>
- [315] C. E. Ochoa, M. B. C. Aries, M. P. J. Aarts, E. J. van Loenen, and J. L. M. Hensen, "Integrating visual and energy criteria for optimal window design in temperate climates," in *Proceedings of the CISBAT 2011 - Cleantech for sustainable buildings conference*, Lausanne, 2011, pp. 589-594.
- [316] Lawrence Berkley National Laboratory. International Glazing Database. [Online]. <http://windows.lbl.gov/g/IGDB/>
- [317] H. Poirazis, Å. Blomsterberg, and M. Wall, "Energy simulations for glazed office buildings in Sweden," *Energy and Buildings*, no. 40, pp. 1161-1170, 2008.
- [318] E. Ghisi and J. A. Tinker, "An Ideal Window Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings," *Building and Environment*, no. 40, pp. 51-61, 2005.
- [319] P. M. Esquivias, J. Navarro, and C. M. Muñoz, "Hacia la optimización del aprovechamiento de la luz natural a través del diseño de huecos," in *Comunicaciones de las Jornadas Técnicas Greencities: 2º Salón de la Eficiencia Energética en Edificación y Espacios Urbanos*, Málaga (España), 2011, pp. 229-274.
- [320] A. Tzempelikos and A. K. Athienitis, "The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand," *Solar Energy*, no. 81, pp. 369-382, 2007.
- [321] J. C. Lam and D. H. W. Li, "An analysis of daylighting and solar heat for cooling-dominated office buildings," *Solar Energy*, vol. 65, no. 4, pp. 251-262, 1999.
- [322] S. Domínguez, J. J. Sendra, A. L. León, and P. M. Esquivias, "Towards energy demand reduction in social housing buildings: envelope system optimization strategies," *Energies*, no. 5, pp. 2263-2287, 2012.
- [323] C. F. Reinhart, "Effects of interior design on the daylight availability in open plan offices," in *Conference Proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficient Buildings*, Pacific Grove, CA., USA., 2002, pp. 1-12.
- [324] B. Matusiak, "The impact of window form on the size impression of the room - Full-scale studies," *Architectural Science Review*, no. 49, pp. 43-51, 2006.
- [325] I. T. Dogrusoy and M. Tureyen, "A field study on determination of preferences for windows in office environments," *Building and Environment*, no. 42, pp. 3660-3668, 2007.
- [326] A. D. Galasiu and J. A. Veitch, "Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review," *Energy and Buildings*, no. 38, pp. 728-742, 2006.
- [327] L. Bellia, F. De Falco, and F. Minichiello, "Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates," *Applied Thermal Engineering*, no. 54, pp. 190-201, 2013.
- [328] A. Aldawoud, "Conventional fixed shading devices in comparison to an electrochromic glazing system in hot, dry climate," *Energy and Buildings*, no. 59, pp. 104-110, 2013.
- [329] J. Yao, "An investigation into the impact of movable solar shades on energy, indoor thermal and visual comfort improvements," *Building and Environment*, no. 71, pp. 24-32, 2014.

- [330] W. O'Brien, K. Kapsis, and A. Athienitis, "Manually-operated window shade patterns in office buildings: A critical review," *Building and Environment*, no. 60, pp. 319-338, 2013.
- [331] Y.-W. Lim, M. H. Ahmad, and D. R. Ossena, "Internal Shading for efficient Tropical Daylighting in Malaysian Contemporary High-Rise Open Plan Office," *Indoor Built Environment*, vol. 0, pp. 1-20, 2012.
- [332] K. Van Den Wymelenberg, "Patterns of occupant interaction with window blinds: A literature review," *Energy and Buildings*, vol. 51, pp. 165-176, 2012.
- [333] K. Deuk-Woo, P. Meng, and P. Cheol-Soo, "Comparative control strategies of exterior and interior blind systems," *Lighting Research and Technology*, vol. 44, pp. 291-308, 2012.
- [334] K. Ji-Hyun, P. Young-Joon, Y. Myoung-Souk, and K. Kwang-Woo, "An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer," *Building and Environment*, vol. 44, pp. 1517-1527, 2009.
- [335] M. V. Nielsen, S. Svendsen, and L. B. Jensen, "Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight," *Solar Energy*, no. 85, pp. 757-768, 2011.
- [336] M. C. Dubois, *Solar shading for Low energy Use and Daylight Quality in Offices*. Lind: Department of construction and Architecture. Lund University, 2001.
- [337] S. Y. Koo, M. S. Yeo, and K. W. Kim, "Automated blind control to maximize the benefits of daylight in buildings," *Building and Environment*, vol. 45, no. 6, pp. 1508-1520, 2010.
- [338] A. L. León, S. Domínguez, M. A. Campano, and C. Ramírez-Balas, "Reducing the energy demand of multi-dwelling units in a Mediterranean climate using solar protection elements," *Energies*, no. 5, pp. 3398-3424, 2012.
- [339] A. I. Palmero-Marrero and A. C. Oliveira, "Effect of louver shading devices on building energy requirements," *Applied Energy*, no. 87, pp. 2040-2049, 2010.
- [340] M. David, M. Donn, F. Garde, and A. Lenoir, "Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades," *Building and Environment*, no. 46, pp. 1489-1496, 2011.
- [341] Y. Zhang and P. Barrett, "Factors influencing occupants' blind-control behaviour in a naturally ventilated office building," *Building and Environment*, vol. 54, pp. 137-147, 2012.
- [342] P. M. Esquivias, D. Moreno, and M. Fernández, "Ahorro energético y confort lumínico: la protección solar en el paradigma de la arquitectura actual," in *Comunicaciones y 2ª bienal de proyectos de edificación y urbanismo sostenible*, Málaga (España), 2014, pp. 349-365.
- [343] D. Moreno Rangel, P. M. Esquivias Fernández, and M. Fernández Expósito, "Luminous and thermal impact of fixed solar shading devices," in *III International Congress on Construction and Building Research*, Madrid, 2015, pp. 188-189.
- [344] G. Datta, "Effect of fixed horizontal louver shading devices on thermal performance of building by TRNSYS Simulation," *Renewable Energy*, no. 23, pp. 497-507, 2001.
- [345] S. T. Claros and A. Soler, "Indoor daylight influence of light-shelf and model reflectance on light-shelf performance in Madrid for hours with unit sunshine fraction," *Building and Environment*, no. 37, pp. 587-598, 2002.
- [346] P. M. Esquivias, C. M. Muñoz, I. Acosta, D. Moreno, and J. Navarro, "Climate-based daylight analysis of fixed shading devices in an open-plan office," *Lighting Research and Technology*, no. 0, pp. 1-16, 2015.
- [347] D. A. Chi, D. Moreno, P. M. Esquivias, and J. Navarro, "Optimization method for perforated solar screen design to improve daylighting using orthogonal arrays and climate-based daylight modelling," *Journal of Building Performance Simulation*, vol. In press, pp. 0-17, Jun. 2016.

- [348] N. A. Al-Tamimi and S. F. S. Fadzil, "The potential of shading devices for temperature reduction in high-rise residential buildings in the tropics," *Procedia Engineering*, no. 21, pp. 273-282, 2011.
- [349] R. P. Leslie, "Capturing the daylight dividend in buildings: why and how?," *Building and Environment*, no. 38, pp. 381-385, 2003.
- [350] A. A. M. Ali and T. M. F. Ahmed, "Evaluating the impact of shading devices on the indoor thermal comfort of residential buildings in Egypt," in *SimBuild 2012*, Madison (Wisconsin), 2012, pp. 603-612.
- [351] J. Christoffersen, E. Petersen, and K. Johnsen, "An experimental evaluation of daylight systems and lighting control," in *Right Light 4, 4th European conference on energy-efficient lighting*, Copenhagen, 1997, pp. 245-254.
- [352] N. H. Wong and S. Li, "A study of the effectiveness of passive climate control in naturally ventilated residential buildings in Singapore," *Building and environment*, vol. 42, pp. 1395-1405, 2007.
- [353] H. H. Alzoubi and A. H. Al-Zoubi, "Assessment of building facade performance in terms of daylighting and the associated energy consumption in architectural spaces: Vertical and horizontal shades devices for southern exposure facades," *Energy Conversion and Management*, pp. 1592-1599, 2010.
- [354] M. Mandalaki, K. Zervas, T. Tsoutsos, and A. Vazakas, "Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use," *Solar Energy*, no. 86, pp. 2561-2575, 2012.
- [355] EERE- U.S. Department of Energy. EnergyPlus Energy Simulation Software: Weather Data. [Online].  
[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data2.cfm/region=6\\_europe\\_wmo\\_region\\_6](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data2.cfm/region=6_europe_wmo_region_6)
- [356] R. Kittler and N. Ruck, "Definition of typical and average exterior daylight conditions in different climatic zones," *Energy and Buildings*, no. 6, pp. 253-259, 1984.
- [357] M. C. Peel, B. L. Finlayson, and T. A. McMahon, "Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification," *Hydrology and Earth System Sciences*, no. 11, pp. 1633-1644, 2007.
- [358] K. Lagios. DIVA for Rhino: Environmental Analysis for Buildings. [Online].  
<http://diva4rhino.com/>
- [359] G. Ward and R. Shakespeare, *Rendering with RADIANCE, The Art and Science of Lighting Visualization*. California: Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- [360] D. B. Crawley, et al., "EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program," *Energy and Buildings*, no. 33, pp. 319-331, 2001.
- [361] D. B. Crawley, et al., "What next for building energy simulation- A glimpse of the future," in *Fifth International IBPSA Conference*, Prague, 1997.
- [362] M. M. Pflaum, C. O. Pedersen, and L. Lawrie, "The heat balance loads calculator: A windows-based program for calculating heating and cooling loads for buildings," in *Fourth International IBPSA Conference*, Madison, 1995, pp. 649-652.
- [363] R. Strand, et al., "Enhancing and extending the capabilities of the building heat balance simulation techniques for use in EnergyPlus," in *Sixth International IBPSA Conference*, Kyoto, 1999.
- [364] G. Yun and K. S. Kim, "An empirical validation of lighting energy consumption using the integrated simulation method," *Energy and Buildings*, no. 57, pp. 144-154, 2013.
- [365] G. Ramos and E. Ghisi, "Analysis of daylight calculated using the EnergyPlus programme," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 14, pp. 1948-1958, 2010.

- [366] H. A. Wasilowski and C. F. Reinhart, "Modelling an existing building in designbuilder/energyplus: custom versus default inputs," in *Eleventh International IBPSA Conference*, Glasgow, 2009, pp. 1252-1259.
- [367] M. Andersen, et al., "An intuitive daylighting performance analysis and optimization approach," *Building Research and Information*, vol. 36, no. 6, pp. 593-607, 2008.
- [368] C. F. Reinhart and D. A. Weissman, "The daylit area -Correlating architectural assessments with current and emerging daylight availability metrics," *Building and Environment*, vol. 50, pp. 155-164, 2012.
- [369] S. E. Selkowitz, "High performance glazing systems: Architectural opportunities for the 21st century," in *Glass Processing Days Conference*, Tampere, 1999.
- [370] C. F. Reinhart and K. Voss, "Monitoring manual control of electric lighting and blinds," *Lighting Research and Technology*, vol. 35, no. 3, pp. 243-260, 2003.
- [371] M. Foster and T. Oreszczyn, "Occupant control of passive systems: the use of Venetian blinds," *Building and Environment*, vol. 36, pp. 149-155, 2001.
- [372] Atelier Du Pont. (2015) Atelier Du pont. [Online].  
<http://www.atelierdupont.fr/7503626/gradins-jardins>

## Acrónimos

ARHESUS - Architecture, Heritage and Sustainability Group: Grupo de Investigación “Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía”.

ASHRAE - American Society of Heating, Cooling and Air-Conditioning Engineers. Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado.

BIM - Building Information Modelling.

BREEAM - Building Research Establishment Environmental Assessment Method.

CIE - Comission Internationale de l’Eclairage. Comité Internacional de la Iluminación. International Commission on Illumination.

ECBCS - Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme. Programa de Conservación de Energía en los Edificios y en los Sistemas Comunitarios.

IEA - International Energy Agency. Agencia Internacional de la Energía.

IESNA - Illuminating Engineering Society of North America. Sociedad Americana de Ingenieros de Iluminación.

IWEC - International Weather data for Energy Calculations.

LEED - Leadership in Energy and Environmental Design.

SLL - Society of Light and Lighting. Sociedad de la Luz y la Iluminación

SHC - Solar Heating and Cooling Programme. Programa de Calefacción y Refrigeración Solar.





## Glosario de términos

Absorción (a): proceso por el cual la energía radiante se transforma en otra forma de energía diferente por interacción con la materia

Absortividad (a) o absortancia: relación entre el flujo radiante o luminoso absorbido y el flujo incidente bajo condiciones específicas.

Acceso solar: la continua disponibilidad de luz solar directa que posee una edificación y sin obstrucción de otra de propiedad (edificios, vegetación u otro impedimento). Este acceso solar se calcula con el diagrama de trayectoria solar para cada edificación

Acimut (a) o azimut: ángulo o longitud de arco medido sobre el horizonte celeste que forman el punto cardinal Sur y la proyección vertical del Sol sobre el horizonte del observador situado en alguna latitud. Se mide en grados desde el punto cardinal Sur en el sentido de las agujas del reloj.

Albedo: porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma.

Altura solar ( $\gamma$ ) o altitud o elevación: arco de vertical contado desde el horizonte hasta el astro. Su valor absoluto es siempre menor o igual que  $90^\circ$  y, por convenio, es un valor positivo si el astro es visible (es decir si está sobre el horizonte) y negativo si no es visible (es decir si está bajo el horizonte). Es una de las dos coordenadas horizontales, siendo la otra el azimut o acimut. La altura y el acimut son coordenadas que dependen de la posición del observador.

Ángulo de incidencia: ángulo que forma la trayectoria de la luz con la normal al plano de incidencia.

Área de trabajo: área parcial en el lugar de trabajo en el que se está llevando a cabo la tarea visual. Para lugares donde el tamaño y/o la localización del área de trabajo sean conocidos, el área donde el trabajo se esté realizando.

Área iluminada naturalmente (daylit area): área del espacio iluminada principalmente por la luz natural.

Archivo climático estandarizado: Archivo climático obtenido del tratamiento estadístico de un conjunto de varios años de datos climáticos reales con el fin de proporcionar años climáticos estadísticos, de utilidad para las simulaciones de edificios.

Autonomía Espacial de Luz Natural (Spatial Daylight Autonomy -sDA): porcentaje del área de análisis (el área donde se realizan los cálculos -normalmente a lo largo de todo el espacio) que alcanza un nivel mínimo de iluminación natural de 300 lux durante el 50% de las horas operativas anuales.

Autonomía de Luz Natural (Daylight Autonomy -DA): porcentaje de un intervalo de tiempo considerado durante el cual se puede mantener un nivel mínimo de iluminación sólo con luz natural

Autonomía Continua de Luz Natural (Continuous Daylight Autonomy -DAcon): definida como una modificación de la Autonomía de Luz Natural, la Autonomía Continua de Luz Natural concede puntos parciales de forma lineal a valores por debajo del límite de iluminancia definido por el usuario.

Autonomía Máxima de Luz Natural (Maximum Daylight Autonomy -DAmax): este concepto es un intento de hacer un análisis del deslumbramiento en base a la iluminancia. Se basa en la idea de calcular la Autonomía de Luz Natural con un límite de iluminancia diez veces mayor que la

iluminancia de diseño. Sin embargo, el concepto de un factor constante de diez veces la iluminancia de diseño se basa en intuiciones en vez de investigación documentada.

Candela: unidad básica del Sistema Internacional en fotometría. Intensidad luminosa, en una dirección dada por una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz y presenta una intensidad radiante en esa dirección de  $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ .

Candela-pie o foot-candle (fc): es la medida de la iluminancia y emitancia luminosa del sistema imperial de medida, de aplicación en Estados Unidos y Reino Unido. Mide el flujo luminoso por unidad de área, siendo la iluminación que recibe una superficie equivalente a una candela y a un pie de distancia. Equivale a 10.764 lux.

CIE Test Cases: conjunto de procedimientos de comparación y validación de los resultados de los programas de simulación de iluminación.

Cielo General Estándar CIE (CIE Standard General Sky): conjunto de 15 distribuciones de luminancia de cielo que modela (clasifica) el cielo desde muy nublado a despejado. Las distribuciones de luminancia relativa están descritas en ISO 15469:2004/CIE S 011:2003 Distribución espacial de la luz diurna- Cielo General patrón CIE. El cielo despejado patrón CIE está incorporado como caso particular y el cielo nublado patrón CIE esta incorporado como fórmula separada.

Cielo Nublado Estándar CIE (CIE Standard Overcast Sky): cielo completamente nublado para el cual la relación de su luminancia  $L_{\theta}$ , en la dirección a un ángulo  $\theta$  por encima de la horizontal y su luminancia  $L_z$  en el cenit dada por la relación:

$$L_{\theta} = L_z (1 + 2 \sin \theta) / 3$$

Coeficiente de Luz Natural (Daylight Coefficient -DC): relación numérica entre la intensidad luminosa de una porción de cielo y la cantidad de esta luz que llega al punto de estudio. Los *Coeficientes de Luz Natural* representan la contribución de cada segmento de la bóveda celeste a la iluminancia total de un punto del espacio.

Componente de Cielo (Sky Component -SC) del factor de iluminación natural: relación de la parte de iluminancia en un punto de un plano dado que se recibe directamente (o a través de un vidrio claro) de un cielo con una distribución de luminancias asumida o conocida, y la iluminancia en un plano horizontal debido a la hemisferia sin obstrucción de este cielo, donde la contribución de la luz solar directa en ambas iluminancias se ha excluido.

Componente Reflejada Interior (Internally Reflected Component -IRC) del factor de iluminación natural: razón entre la parte de iluminancia en un punto de un plano dado, recibida por reflexión en superficies interiores iluminadas directa o indirectamente por un cielo de distribución de luminancia conocida o supuesta, y la iluminancia en un plano horizontal, que proviene sin obstrucción en un hemisferio de ese cielo, donde la contribución de la luz solar directa a ambas iluminancias es excluida.

Componente Reflejada Exterior (Externally Reflected Component -ERC) del factor de iluminación natural: relación entre la parte de la iluminancia en un punto de un plano dado en un interior que es recibida directamente de superficies reflectoras externas iluminadas directa o indirectamente por un cielo de supuesta o conocida distribución de luminancia, y la iluminancia en el plano horizontal debida a un hemisferio de este cielo libre de obstáculos, donde se excluye la contribución de la luz solar directa a ambas iluminancias.

Componente Vertical de Cielo (Vertical Sky Component -VSC): parte de componente de cielo establecida en el Factor de Iluminación Natural (DF) que se recibe en un punto de un plano vertical, utilizando el Cielo Nublado Estándar CIE.

Condiciones climáticas locales: estadística del tiempo atmosférico, normalmente sobre un intervalo de 30 años. Se mide al evaluar los patrones de variación en temperatura, humedad, presión atmosférica, viento, precipitación, cuenta de partícula atmosférica y otras variables meteorológicas en una región dada sobre periodos largos de tiempo.

Confort visual: es un estado generado por la armonía o equilibrio de una elevada cantidad de variables. Las principales están relacionadas con la naturaleza, estabilidad y cantidad de luz, y todo ello en relación con las exigencias visuales de las tareas y en el contexto de los factores personales.

Constante luminosa solar: iluminancia producida por la radiación solar extraterrestre sobre una superficie perpendicular a los rayos del Sol a una distancia intermedia entre la Tierra y el Sol.

Constante solar: irradiancia producida por la radiación solar del espacio en una superficie perpendicular a los rayos del Sol en una distancia media Sol-Tierra.

Criterio de Suficiente Iluminación Natural: criterio aprobado por la IESNA para la determinar si un espacio tiene suficiente iluminación natural. Este criterio establece que un espacio está suficientemente iluminado naturalmente si el 50% del plano de trabajo alcanza un nivel de iluminación natural de 300 lux durante el 50% del tiempo de estudio considerado.

Curva de frecuencia acumulada: representación gráfica de la frecuencia de ocurrencia de valores de un fenómeno menores que un valor de referencia. El análisis de la frecuencia acumulada se hace con el propósito de obtener una idea de cuantas veces ocurriría un cierto fenómeno.

Curva espectral de sensibilidad fotópica CIE: representación de la sensibilidad espectral del ojo humano en condiciones de visión fotópica. Alcanza su máxima sensibilidad en la longitud de onda del entorno de los 555nm, correspondientes al color amarillo-verdoso. Bajo la visión fotópica se hace posible la percepción del color. Método de evaluar la luz en términos de la sensibilidad espectral humana. El resultado es una valoración de las radiaciones no en términos de su potencia total sino en términos de su capacidad para estimular el ojo humano.

Dependencia de Iluminación (Lighting Dependency -LD): indicador complementario a la Autonomía de Luz Natural, representa el porcentaje de un intervalo de tiempo considerado durante el cual no se puede mantener un nivel mínimo de iluminación sólo con luz natural.

Deslumbramiento: condición de visión en donde existe una molestia o una reducción de la capacidad de ver detalles u objetos y causada por una distribución inadecuada del rango de luminancia, o a contrastes extremos.

Disponibilidad de luz natural (daylight availability): cantidad total de luz disponible en una localización sin presencia de obstrucciones en el horizonte proveniente del Sol y la bóveda celeste que depende de las condiciones climáticas, considerando la turbiedad y la nubosidad, reflejándose en la relación entre la iluminancia global y la iluminancia difusa anual.

Disponibilidad Relativa de Luz Natural (Daylight Availability ratio -DAR): fracción de tiempo en un año en el que se tiene disponible suficiente iluminación natural en la superficie imaginaria del plano de trabajo. Indicador independiente del tiempo que describe la disponibilidad de iluminación natural de un espacio, considerando el impacto anual de los parámetros relativos a la ventana y al clima.

Eficacia luminosa de una radiación: relación entre el flujo luminoso y el flujo radiante correspondiente.

Exposición Anual a la Luz (Annual Light Exposure -ALE): se refiere a dos métricas diferentes relacionadas con la iluminación de objetos sensibles a la luz: cantidad acumulada de luz visible que incide en un punto de interés a lo largo de un año, así como el máximo nivel de iluminación que puede incidir en un punto para un momento dado.

Exposición Solar Anual (Annual Solar Exposure -ASE): porcentaje del plano de trabajo que recibe una iluminancia mayor de 1000 lux durante más de 250 horas. Este porcentaje se limita al 10%.

Espectro de emisión: distribución espectral de la radiación emitida por una fuente luminosa.

Exitancia luminosa en un punto de una superficie: cociente del flujo luminoso que deja un elemento en la superficie que contiene al punto, por el área de ese elemento.

Exitancia radiante en un punto de una superficie: cociente del flujo radiante que deja un elemento en la superficie que contiene al punto, por el área de ese elemento.

Exposición luminosa en un punto de una superficie, para un tiempo dado: cociente entre la energía luminosa incidente en un elemento de la superficie que contiene al punto durante el tiempo dado, y el área de dicho elemento.

Exposición radiante en un punto de una superficie, para un tiempo dado: cociente entre la energía radiante incidente en un elemento de la superficie que contiene al punto durante el tiempo dado, y el área de dicho elemento.

Factor de Cielo (Sky Factor -SF): razón entre la parte de iluminancia en un punto dentro del interior de un edificio debida a la luz que recibe directamente de un cielo y la iluminancia debido sobre un plano horizontal que proviene sin obstrucción de un hemisferio del cielo de luminancia uniforme igual a la de un cielo visible. De estos dos valores de iluminancia se excluye la luz solar directa.

Factor de Iluminación Natural (Daylight Factor -DF): la relación entre el nivel de iluminación en un punto interior y el nivel de iluminación (E) simultánea de un punto en un plano horizontal exterior, debido a la luz que recibía de la bóveda celeste sin presencia de obstrucciones y sin considerar la luz directa proveniente del Sol.

Factor de Iluminación Natural en base climática (Climate based Daylight Factor- DFcb): relación entre el nivel de iluminación en un punto interior y la iluminancia horizontal difusa ( $E_{d,h}$ ) de un punto en un plano horizontal exterior que se da con una cierta frecuencia durante las horas diurnas a lo largo del año y se obtiene de los datos de iluminancia horizontal difusa exterior que se recogen en el archivo climático estandarizado de la localización.

Factor de Iluminación Natural Vertical (DFv): relación entre la iluminancia en un punto de una superficie vertical debida a la luz que proviene directa o indirectamente del cielo y la iluminancia en un plano horizontal debido al hemisferio sin obstrucciones del mismo cielo. La contribución de la luz solar directa está excluida. Considera la luz directa proveniente del cielo y la luz reflejada proveniente del entorno y del suelo, tanto por encima como por debajo del plano horizontal.

Factor solar de un material vítreo  $g_L$ : relación entre la cantidad de calor que penetra en el interior de un local a través del vidrio y la energía solar radiante que incide en dicho vidrio. Término equivalente a transmitancia de energía total. Esta relación es la suma de dos cantidades: la transmitancia radiante del vidrio y la cantidad igual a la relación entre la energía que por

convección y radiación penetra a través del vidrio en el interior del local y la cantidad de energía radiante solar incidente sobre el vidrio. También conocido como Coeficiente de Transmisión Total de Energía Solar o Coeficiente de Ganancias Solares (Solar Heat Gains Coefficient -SHGC).

Factor de viabilidad de iluminación natural (Daylight feasibility factor -DFF): mide la efectividad de la iluminación natural de acuerdo con una fórmula que considera la presencia de aperturas y obstrucciones exteriores.

Flujo directo sobre una superficie: flujo luminoso recibido por una superficie directamente de una fuente luminosa.

Flujo indirecto sobre una superficie: flujo luminoso recibido por una superficie después de la reflexión desde otras superficies.

Flujo luminoso (F, lm) El flujo luminoso es la medida de la potencia luminosa percibida. Difiere del flujo radiante, la medida de la potencia total emitida, en que está ajustada para reflejar la sensibilidad del ojo humano a diferentes longitudes de onda. Su unidad de medida en el Sistema Internacional de Unidades es el lumen (lm) y se define a partir de la unidad básica del SI, la candela (cd), y el ángulo sólido (estereorradián)

Flujo radiante ( $\phi$ , w) Energía radiada por unidad de tiempo. Potencia. Es la medida de la potencia de una radiación electromagnética (incluyendo los infrarrojos, ultravioletas y la luz visible). Es la energía que transportan las ondas por unidad de tiempo. Esta potencia puede ser la total emitida por una fuente o la total que llega a una superficie determinada.

Ganancia solar térmica a través de las ventanas (Solar heat gains -SHG): radiación solar a incidencia normal que se introduce en el edificio a través del acristalamiento. Esta energía solar transmitida puede dividirse entre la que se transmite directamente y la ganancia térmica debido a la transmisión secundaria (proceso de absorción y reemisión).

Horas de soleamiento (sh): cantidad de horas teóricas al año que estará asoleado un local mediante la radiación solar directa que pase a través de ventanas, calculadas mediante exclusivamente la geometría solar, es decir, sin considerar la obstrucción de las nubes o incidencias climáticas.

Iluminancia (Ev) o nivel de iluminación: cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie por unidad de área.

Iluminancia de Diseño del Cielo (Design Sky Illuminance): representa el valor de iluminancia horizontal que se obtiene con una frecuencia mayor del 85% del tiempo entre las 9'00h y las 17'00h a lo largo del año. Este valor depende de la latitud.

Iluminancia global horizontal: iluminancia producida por la luz natural sobre una superficie horizontal a la tierra.

Iluminancia horizontal difusa: iluminancia producida por la luz del cielo sobre una superficie horizontal en la Tierra.

Iluminancia media Mantenido ( $\bar{E}_m$ ): valor medio de iluminancia por debajo de la cual no debe descender el nivel de iluminación en el área especificada. Por tanto, es la iluminancia que se mantiene en el período en el que se debe realizar el mantenimiento de la instalación de iluminación.

Iluminancia Natural Útil (Useful Daylight Illuminance -UDI): presencia anual de iluminancias a lo largo del plano de trabajo que se encuentran en un rango considerado 'útil' por los ocupantes del espacio.

Illuminancia Natural Útil Simultánea (Simultaneous Useful Daylight Illuminance -sUDI<sub>range</sub>): conjunto de 5 indicadores que muestran el porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente 5 rangos diferentes de iluminancia (100 lux, 100-300 lux, 300-500 lux, 500-3000 lux y >3000 lux) durante las horas diurnas debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.

Illuminancia solar directa: iluminancia producida por la luz solar directa en una superficie horizontal sobre la Tierra.

Indicador de iluminación natural: unidad cuantitativa descriptiva de la iluminación natural de un espacio obtenido a partir del tratamiento estadístico de la iluminancia natural que reciben los puntos de cálculo. La evaluación se realiza mediante la definición y aplicación de un criterio de análisis que exprese unos objetivos luminotécnicos.

Indicador Dinámico de Iluminación Natural (Dynamic Daylight Metric -DDM): unidad cuantitativa descriptiva de la iluminación natural de un espacio obtenido a partir del tratamiento estadístico del perfil horario de iluminancias de cada punto de cálculo, resultado de la modelización climática de la luz natural. Los dos principales indicadores actuales son la Autonomía de Luz Natural y la Iluminancia Natural Útil, ambos se basan en el análisis acumulativo de iluminancias de cada punto de cálculo. Cada punto de cálculo se analiza separadamente en base a un rango temporal y un nivel de iluminación.

Insolación: cantidad de energía en forma de radiación solar que llega a un lugar de la Tierra en un momento concreto.

Insolación Excesiva (Excessive Solar Heat Gains -SHGe): porcentaje horas diurnas en que se supera una ganancia solar a través de los huecos exteriores tal que suponga una irradiancia sobre los mismos mayor o igual a  $150 \text{ W/m}^2$ .

Intensidad luminosa: relación entre el flujo luminoso que sale de la fuente y se propaga en el elemento con un ángulo sólido que contiene la dirección dada, por el elemento de ángulo sólido.

Intensidad radiante de una fuente, en una dirección dada: cociente entre el flujo radiante que sale de la fuente y se propaga en un elemento de ángulo sólido que contiene la dirección dada, y el elemento del ángulo sólido.

Irradiancia (E): Es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética.

Irradiancia en un punto de la superficie: cociente entre el flujo radiante incidente en un elemento de superficie que contiene el punto y el área de este elemento.

Irradiancia espectral: cociente de la energía radiante en un intervalo de longitudes de onda incidente sobre un elemento de una superficie, por el área de este elemento y por el intervalo de longitud de onda. Es la potencia recibida por una unidad de área superficial en un diferencial de longitud de onda.

Irradiancia excesiva: Valor de irradiancia que entra a través de la ventana a partir de la cual el usuario se encuentra en unas condiciones ambientales tales que, con cierto grado de certeza, dejará su puesto de trabajo para bloquear la entrada de radiación solar en el espacio, ya sea por deslumbramiento o por sobrecalentamiento. Según las publicaciones científicas, este valor es de  $150 \text{ W/m}^2$  para un espacio no acondicionado artificialmente.

Longitud de onda ( $\lambda$ ): distancia en la dirección de propagación de una onda periódica entre dos puntos sucesivos en los cuales la fase es la misma.

Lumen: unidad del flujo luminoso en el Sistema Internacional. Flujo luminoso emitido en un ángulo sólido de 1 estereorradián por una fuente puntual uniforme que tiene una intensidad luminosa de 1 candela. Flujo luminoso de un haz de radiación monocromática cuya frecuencia es de  $540 \times 10^{12}$  Hz y cuyo flujo radiante es de 1/683 W.

Luminancia en una dirección dada, en un punto dado de una superficie real o imaginaria: cociente entre el flujo luminoso transmitido por un haz elemental que atraviesa el punto dado y que se propaga en un ángulo sólido que contiene la dirección dada y el área proyectada de una sección de dicho rayo que contiene el punto dado.

Luminancia del cielo: luminancia de un elemento celeste. La luminancia en el cenit del hemisferio celeste se conoce específicamente como luminancia del cenit.

Lux: unidad de iluminancia en el Sistema Internacional. Iluminancia producida en una superficie con área de  $1 \text{ m}^2$  por un flujo luminoso de 1 lumen distribuido uniformemente sobre dicha superficie.

Luz: característica de todas las sensaciones y percepciones que es específica de la visión. Radiación que se considera desde el punto de su habilidad de excitar el sistema visual humano.

Luz del cielo: parte de la radiación del cielo capaz de provocar sensación visual.

Luz natural: parte de la radiación solar global capaz de causar una sensación visual.

Luz solar: parte de la radiación solar directa capaz de causar sensación visual.

Masa óptica relativa del aire: relación entre el espesor óptico de la atmósfera con un ángulo a la vertical y el espesor óptico vertical de la atmósfera.

Medio opaco: medio que no transmite radiación en el rango espectral de interés.

Medio traslúcido: medio que transmite una radiación visible básicamente por transmisión difusa, de manera tal que los objetos no se vean distintivamente a través de él.

Medio transparente: medio cuya transmisión es básicamente regular y que generalmente tiene una alta transmitancia regular en el rango espectral de interés.

Método lumen: método de cálculo para predecir la relación entre el número y la forma de fuentes de luz o luminarias, las características de una habitación y la iluminancia media sobre el plano de trabajo.

Método punto a punto: método de cálculo para predecir la iluminancia directa en cada punto sobre el plano de cálculo, empleando datos medidos de distribución de intensidad luminosa de una fuente o luminaria.

Modelación climática de la Luz Natural (Climate Based Daylight Modelling -CBDM): Método de simulación de la iluminancia natural que recibe cada punto del plano de trabajo fundamentado en la combinación del modelo de cielo All-weather y los Coeficientes de Iluminación Natural. Este método proporciona datos de iluminación para cada punto de cálculo en base horaria o sub-horaria a partir de los datos recogidos en los archivos climáticos.

Modelo de distribución de luminancias o modelo All-weather Modelo de Cielo de Perez (All-weather Sky model): es un modelo matemático utilizado para describir la distribución relativa de luminancias de la bóveda celeste que utiliza datos reales recogidos de estaciones meteorológicas a lo largo del mundo. Consiste en dos modelos: modelo de eficacia luminosa y el modelo de distribución de luminancias que permiten clasificar cualquier condición real de cielo entre los 15 modelos de cielo definidos.

Radiación difusa del cielo: la parte de la radiación solar que llega a la Tierra tras sufrir difusión por las moléculas del aire, partículas aerosoles, nubes de partículas u otras partículas.

Radiación electromagnética: emisión o transporte de energía en forma de ondas electromagnéticas con los fotones asociados.

Radiación global solar: Conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. Radiación solar recibida de un ángulo sólido de  $2\pi$  estereorradianes sobre una superficie horizontal. La radiación global incluye la recibida directamente del disco solar y también la radiación celeste difusa dispersada al atravesar la atmósfera.

Radiación óptica: radiación electromagnética con longitudes de onda entre la región de transición a rayos X y la región de transición a ondas de radio.

Radiación solar: radiación electromagnética del Sol.

Radiación solar global reflejada: radiación que resulta de la reflexión de la radiación solar global en la superficie terrestre y en cualquier superficie que intercepte dicha radiación.

Radiación solar directa: la parte de la radiación solar extraterrestre que alcanzan la superficie terrestre tras la atenuación selectiva por la atmósfera.

Radiación térmica: proceso de emisión en el cual la energía radiante se origina en la agitación térmica de las partículas de la materia. Radiación emitida mediante dicho proceso.

Radiación ultravioleta: radiación cuyas longitudes de onda son más cortas que los de la radiación visible, desde 1 nm a 380 nm.

Radiación visible: cualquier radiación óptica capaz de generar una sensación visual directamente. El límite inferior está entre 360 nm y 400 nm y el límite superior entre 760 nm y 830 nm.

Rango de Iluminancia Natural Útil según la tarea visual: correlación entre los niveles de iluminación y su idoneidad para el desarrollo de tareas visuales y clasificación según el nivel de precisión de las tareas visuales. Se establecen 5 rangos:

Rango de iluminancias	Nivel de precisión
0 a 100 lux	Sin exigencia
100 a 300 lux	Bajo
300 a 500 lux	Medio
500 a 3000 lux	Alto
>3000 lux	Muy alto

Tabla: relación entre el nivel de iluminación y el nivel de precisión de la tarea visual

Rango luminoso: la mayor distancia a la que una señal de luz dada puede ser reconocida en cualquier circunstancia, limitado solamente por la transmisividad atmosférica y por el umbral de iluminancia del ojo del observador.

Reflectancia ( $\rho$ ): relación entre el flujo radiante o luminoso reflejado y el flujo incidente en las condiciones dadas.

Reflectividad de un material ( $\rho$ ): reflectancia de una capa de material de tal espesor que no exista cambio de reflectancia con el incremento de espesor.

Reflexión ( $\rho$ ): proceso por el cual la radiación es devuelta por una superficie o un medio, sin cambio de frecuencia de sus componentes monocromáticos.



Ritmo biológico: cambio periódico característico de un organismo vivo o proceso relacionado con la vida, como los ritmos circadianos, que tienen un periodo aproximado de 24 h. Estos ritmos biológicos pueden estar influenciados por la radiación óptica.

Suficiencia de Iluminación Natural Mantenido (Maintained Daylight Sufficiency -DSm): porcentaje de horas en que se alcanzan simultáneamente 300 lux en el 50% de los sensores del plano de trabajo debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.

Suficiencia de Iluminación Natural Global (Global Daylight Sufficiency -DSg): porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente 300 lux durante el 50% de las horas diurnas debido exclusivamente a la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.

Suficiencia de Iluminación Natural Difusa (Diffuse Daylight Sufficiency -DSd): porcentaje del plano de trabajo que alcanza simultáneamente 300 lux durante el 50% de las horas diurnas mediante exclusivamente la componente difusa de la iluminación natural en base a los datos recogidos en los archivos climáticos.

Tiempo astronómico de insolación: conjunto de los intervalos de tiempo dentro de un terminado periodo de tiempo durante el cual el sol está por encima del horizonte despejado.

Tiempo de exposición: diferencia entre el tiempo de fin y el tiempo de inicio de la exposición a una radiación.

Tiempo de insolación: suma de los intervalos de tiempo dentro de un periodo dado durante el cual la irradiancia de la radiación solar directa en un plano normal y la dirección del sol es igual o mayor que  $120 \text{ W/m}^2$ .

Tiempo de insolación relativa: razón entre el tiempo de insolación y el tiempo de insolación posible en el mismo periodo de tiempo.

Tiempo posible de insolación en una localización particular: suma de los intervalos temporales dentro de un periodo de tiempo dado, durante el cual el Sol está por encima del horizonte real y puede ser oclutado por montañas, edificios, árboles, etc.

Trabajo visual: elementos visuales de la labor que se realiza. Los elementos visuales principales son el tamaño, su luminosidad, el contraste sobre el fondo y su duración.

Transmisión: paso de la radiación a través de un medio sin cambiar la frecuencia de sus componentes monocromáticos.

Transmisividad atmosférica: transmitancia luminosa regular de la atmósfera sobre un recorrido especificado de una determinada longitud.

Transmitancia: relación entre el flujo radiante o luminoso y el flujo incidente en las condiciones dadas.

Transmitancia atmosférica: transmitancia obtenida cuando la radiación solar incide perpendicularmente sobre la atmósfera de la Tierra.

Umbral de iluminancia: la iluminancia más pequeña producida sobre el ojo del observador por una fuente luminosa que asegura la percepción de la fuente frente a un fondo de iluminancia determinada y donde la iluminancia se considera un elemento de la superficie normal a los rayos que inciden en el ojo.

Uniformidad de iluminancia: relación entre la iluminancia mínima y a iluminancia media en el plano.

Ventana: apertura a la luz del día en un área vertical o casi vertical de una habitación.

Visión escotópica: visión del ojo normal cuando los bastones son los principales fotorreceptores activos. La visión escotópica se produce cuando el ojo se adapta a niveles de luminancia menores de  $10^{-3}$  cd/m<sup>2</sup>. En comparación con la visión fotópica, la visión escotópica está caracterizada por la ausencia de la percepción del color y por el cambio de sensibilidad visual alrededor de longitudes de onda cortas.

Visión fotópica: visión del ojo normal en la cual los conos son los principales fotorreceptores activos.