

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE UN
BIOPLÁSTICO ELABORADO CON HARINA DE YUCA GELATINIZADA

NATHALIA BEJARANO ARANA

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA CALI

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

SANTIAGO DE CALI - COLOMBIA

2014

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE UN
BIOPLÁSTICO ELABORADO CON HARINA DE YUCA GELATINIZADA

NATHALIA BEJARANO ARANA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA
AGROINDUSTRIAL

DIRECTORA: Mg. DIANA PAOLA NAVIA PORRAS

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA CALI

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

SANTIAGO DE CALI - COLOMBIA

2014

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL PRESIDENTE DE JURADO

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

SANTIAGO DE CALI, 2014

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecerle a Dios por permitirme cumplir una de las metas más importantes de mi vida.

A mi familia la cual me acompañó en todo este largo proceso, brindándome su total apoyo, comprensión y palabras de aliento, las cuales me permitieron culminar con éxito esta difícil tarea, en especial a mis padres quienes fomentaron en mí el interés por aprender y crecer como persona, convirtiéndose en el pilar para mi desarrollo como profesional.

A mi tutora Mg. Diana Paola Navia quien puso su confianza en mí y me brindo la posibilidad del desarrollo de este trabajo de grado, sus directivas y acompañamiento han ampliado mucho más mis horizontes. También un recuerdo muy especial a mi profesora Gloria Carmenza Rodríguez de la Pava quien creyó en mis habilidades y me recomendó como investigadora de este proyecto, un lugar muy especial ocupan todos mis profesores quienes en su ardua tarea me han brindado los recursos para llevar a cabo todas las metas que se avecinan, al igual que los laboratoristas, en especial a Johannes Delgado Ospina, quienes gentilmente me atendieron y asesoraron durante la realización de este proyecto. Al grupo de investigación Biotecnología de la universidad San Buenaventura, que colaboró en el financiamiento de este proyecto.

A los miembros del laboratorio de reología y empaques de la universidad del Cauca, quienes me brindaron un espacio para llevar a cabo esta tarea y concluirla de manera exitosa.

Finalmente a las personas que han estado conmigo durante la carrera y me han brindado de una u otra forma su apoyo en la culminación de esta etapa de mi vida.

Santiago de Cali, Junio de 2014

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	10
1. PROBLEMÁTICA	122
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	122
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	133
1.3 OBJETIVOS.....	155
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	155
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	155
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DE ARTE	166
2.1 GENERALIDADES DE LA YUCA.....	166
2.1.1 YUCA INDUSTRIAL	177
2.2 FIBRAS.....	18
2.2.1 FIBRA DE FIQUE	19
2.3 ADITIVOS	2020
2.3.1 PLASTIFICANTE	21
2.3.2 SURFACTANTES	22
2.3.3 LUBRICANTES	22
2.4 PROCESO DE GELATINIZACIÓN	23
2.4 TÉCNICAS DE MOLDEO	25
2.4.1 EXTRUSIÓN.....	266
2.4.2 MOLDEO POR INYECCIÓN	266
2.4.3 MOLDEO POR SOPLADO.....	26
2.4.4 TERMO CONFORMADO	26
2.4.5 MOLDEO POR COMPRESIÓN.....	277
2.5 ESTADO DEL ARTE.....	29
3. METODOLOGÍA	31
3.1 MATERIAS PRIMAS.....	311
3.1.1 HARINA DE YUCA.....	31
3.1.2 FIBRA DE FIQUE.....	31
3.1.3 PLASTIFICANTE.	3131
3.1.4 ADITIVOS.....	3131
3.2 ELABORACIÓN DE LOS BIOPLÁSTICOS.....	332

3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	344
3.3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	355
3.4 PRUEBAS MECÁNICAS	355
3.4.1 PRUEBA TENSIÓN.....	355
3.4.2 PRUEBA FLEXIÓN.....	366
3.5 PRUEBAS DE COLOR Y DENSIDAD	377
3.5.1 COLOR.	377
3.5.2 DENSIDAD.....	388
3.6 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN	388
3.6.1 MODELACIÓN MATEMÁTICA.	399
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1 PROPIEDADES MECÁNICAS.....	4141
4.2 COLOR	455
4.3 DENSIDAD	488
4.4 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN	499
5. CONCLUSIONES	555
6. RECOMENDACIONES	566
7. BIBLIOGRAFÍA	577
8. ANEXOS	677

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cambio de los gránulos de almidón frente a un proceso hidrotérmico.....	24
Figura 2. Moldeo por compresión.....	28
Figura 3. Insumos usados para la elaboración de las muestras.....	32
Figura 4. Proceso elaboración harina integral de yuca.....	32
Figura 5. Equipos usados para la elaboración de las muestras.....	33
Figura 6. Forma de ubicar la probeta en el equipo: tensión.....	35
Figura 7. Forma de ubicar la muestra en el equipo: flexión.....	36
Figura 8. Colorímetro CM-600d; Konica minolta optics inc.....	37
Figura 9. Balanza analítica ohaus pa214c38.....	38
Figura 10. Desecadores para prueba de adsorción.....	39
Figura 11. Pruebas mecánicas: Flexión.....	42
Figura 12. Pruebas mecánicas: Tensión.....	43
Figura 13. Luminosidad.....	46
Figura 14. Parámetro.....	46
Figura 15. Parámetro.....	47
Figura 16. Comportamiento densidad.....	49
Figura 17. Isotermas de adsorción experimentales y predichas con el modelo peleg, de los bioplásticos: Ta y muestra control.....	51

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Temperatura de gelatinización en diferentes tipos de almidones.....	24
Cuadro 2. Diseño experimental... ..	34
Cuadro 3. Codificación de los tratamientos.....	34
Cuadro 4. Modelos matemáticos de ajuste por encima de 0.9.....	40
Cuadro 5. Resultados obtenidos en pruebas Mecánicas.....	42
Cuadro 6. Constantes isotermas.....	52
Cuadro 7. Resultados experimentales de la adsorción de vapor de agua (g agua/g materia seca).....	53

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Anova y post-anova pruebas mecánicas.....	67
Anexo B. Anova y post-anova densidad.....	71
Anexo C. Anova y post-anova color.....	72
Anexo D. Anova y post-anova Isotermas.....	75

INTRODUCCIÓN

Plástico viene de la palabra griega “*plastikos*”, la cual significa susceptible a ser moldeado en diferentes formas con propiedades de elasticidad, ductilidad, y resistencia que pueden derivarse de un proceso o del material de fabricación, convirtiéndolo en un material altamente apetecido por su gran variedad de aplicaciones. Los plásticos se obtienen a partir de procesos químicos como la policondensación y poliadición, para los cuales alrededor del 90% de las materias primas utilizadas corresponden a químicos orgánicos industriales que se derivan del petróleo y del gas natural (Wittcoff y Reuben, 2002).

Este material se utiliza en las industrias de construcción, transporte, empaques, muebles, en la fabricación de aparatos domésticos y en alimentos y bebidas, debido a su disponibilidad en el medio y a las características mecánicas de funcionalidad favorables, tales como la alta resistencia a la tracción, buenas propiedades de barrera al oxígeno y bajo costo y capacidad de sellado térmico, entre otras (Tharanathan, 2003). A pesar de sus bondades, el uso de los plásticos ha traído consecuencias negativas para el medio ambiente, pues su proceso de degradación es muy lento y en algunos casos inexistentes, lo que los ha clasificado como una de las principales fuentes de contaminación a nivel mundial.

En Colombia la disposición final y tratamiento de los desechos han generado problemas ambientales y de comercialización, ya que generan grandes costos de transporte (Angulo *et al.*, 2012), una de estas disposiciones es la quema de basuras, lo cual deteriora el medio ambiente al ser emitidos gases de efecto invernadero, producto de su combustión. Al reutilizar estos residuos, sólo se pueden usar algunos de estos materiales, ya que la combinación de plásticos en la formación de un producto hace difícil su reciclaje o reutilización, además que la implementación de esta práctica es muy compleja.

Una de las alternativas para mitigar la problemática ambiental descrita anteriormente, es la implementación y el desarrollo de materiales elaborados con recursos biológicos de origen animal, marino, agrícola y microbiano, siendo los de origen agrícola unos de los más investigados ya que son abundantes y están ampliamente disponibles (Villada *et al.*, 2007). Un ejemplo de estos es el almidón, una materia prima orgánica muy utilizada en la elaboración de plásticos biodegradables gracias a su estructura granular y molecular, su semi-cristalinidad, así como su alta disponibilidad, biodegradabilidad y bajo costo (Valero *et al.*, 2013) (Olivato *et al.*, 2013) (Avedaño-Cetina, 2009). Por lo anterior, se están haciendo estudios de diferentes fuentes de obtención de este polímero natural, sin embargo su alta higroscopicidad y su poca resistencia, son inconvenientes que han ocasionado que este tipo de productos aún no se comercialicen, lo cual ha impulsado la investigación de estrategias que permitan superar sus limitaciones.

Es así, como la modificación de su estructura, la adición de fibras o arcillas reforzantes (Valero *et al.*, 2013), y las modificaciones en las técnicas y condiciones de procesamiento, son alternativas usadas para mejorar las propiedades de los productos finales obtenidos elaborados a partir de recursos amiláceos, para favorecer su resistencia mecánica, aumentar la rigidez y funcionalidad de los mismos (Escandón, 2013). El objetivo de este trabajo fue valorar el efecto de la variación de la temperatura y presión de compresión en las propiedades mecánicas de flexión y tensión, así como también en el color, densidad y adsorción de agua de un polímero a base de harina de yuca gelatinizada.

1. PROBLEMÁTICA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los plásticos sintéticos son ampliamente usados en la vida cotidiana gracias a sus diferentes características de resistencia a los esfuerzos de tensión y flexión, su alta durabilidad, baja densidad, entre otras, que favorecen su venta y uso, (Wittcoff y Reuben, 2002), es por ello que su demanda ha aumentado progresivamente desde su descubrimiento, trayendo consigo una serie de problemáticas ambientales, ya que la forma en que son desechados o eliminados, puede llegar a la producción de diferentes gases tóxicos que se emiten a la atmósfera, así como también la contaminación de recursos hídricos, degradación de la fauna, entre otros, gracias a la acumulación de estos desechos, que cuentan con una lenta degradabilidad y pueden permanecer años incluso hasta décadas (Gray *et al.*, 2004) .

Todas estas problemáticas han llevado al desarrollo de investigaciones para la producción de sustitutos de los plásticos sintéticos, apuntando a la generación de materiales a partir de fuentes renovables como lo son los bioplásticos, una de estas fuentes son los recursos amiláceos, ya que están formados por estructuras semicristalinas que les confiere propiedades fisicoquímicas y características funcionales atractivas para la aplicación en plásticos.

Este trabajo, se realizó para dar respuesta a necesidades específicas de estudios previos, en donde el uso de harina nativa de yuca fue empleada para obtener bioplásticos por la técnica de moldeo compresión, resultando en materiales con deficiencias en la plastificación (Navia *et al.*, 2013), por lo tanto se empleó harina de yuca gelatinizada y se realizaron variaciones en las condiciones de procesamiento para favorecer sus propiedades.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Actualmente los plásticos de origen natural tienen la ventaja de degradarse fácilmente, ya que provienen de fuentes renovables como lo son, lípidos, proteínas y polisacáridos, siendo estos últimos conocidos por su abundancia en la naturaleza y facilidad en el proceso de plastificación para la fabricación de diferentes matrices poliméricas, los cuales han llegado a tener un fuerte desarrollo investigativo en la producción de diferentes materiales bioplásticos (Villada y Velasco, 2008).

Se estima que en el mundo se producen 60 millones de toneladas/ año de almidón de diferentes tubérculos, cereales y raíces, entre las que se encuentra la yuca, que cuenta con el 10% de toda esta producción. En Colombia la yuca representa estabilidad económica y social para diferentes regiones, donde es cultivada por pequeños agricultores (Corporación Colombiana Internacional, 1999), ya que puede plantarse en una gran variedad de suelos, cultivándose desde el nivel del mar hasta 2.200 msnm de altitud, teniendo así alrededor de 185000 hectáreas cultivadas de este tubérculo, de las cuales 26.320 ha corresponden a variedades de yuca industrial (FAO, 2013), estas últimas usadas principalmente para la producción de productos o subproductos, evitando perjudicar la seguridad alimentaria. En este trabajo, se utilizó variedad de yuca MPER-183, por sus ventajas de rendimiento en cultivo y producción de harina (FAO, 2013), y viabilidad para producción de bioplásticos (Navia *et al.*, 2013).

Las bondades de la harina en su estado nativo (sin modificaciones físicas, químicas o enzimáticas) se potencializan al gelatinizarla previamente a su procesamiento, ya que esto favorece los procesos de adhesión con los demás componentes utilizados en la fabricación de los bioplásticos, también produce reacciones como la expansión granular, la cristalización, entre otras, que dan lugar a diferentes propiedades físicas del material, asimismo, la incorporación de

harinas en una matriz termoplástica proporciona interacciones entre sus componentes afectando propiedades como, la densidad, el contenido de humedad, esfuerzo, entre otras (Pelissari *et al.*, 2013), adicionalmente, la incorporación de fibras naturales como el fique, una de las fibras más cultivadas en Colombia, y reconocida por su dureza y resistencia, proporciona un aumento de las propiedades mecánicas del material. Por otra parte, al procesar la matriz de harina gelatinizada-fibra bajo condiciones controladas de calor y temperatura usando la técnica de moldeo por compresión, se promueve la formación del polímero en un proceso de corta duración, cuyos cambios en la estructura de la matriz podrían afectar positivamente las propiedades de adsorción de agua, mecánicas, entre otras (Ciannamea *et al.*, 2014), favoreciendo una reducción de su higroscopicidad, y consecuentemente los objetivos de este estudio.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Evaluar las propiedades físico-químicas de un bioplástico elaborado con harina de yuca gelatinizada.

1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la presión y la temperatura sobre el color, densidad, isothermas de adsorción de agua y propiedades mecánicas de flexión y tensión de los bioplásticos elaborados con harina de yuca gelatinizada.
- Determinar el efecto de la gelatinización en la harina de yuca sobre las propiedades mecánicas y de adsorción de agua de los bioplásticos elaborados.
- Establecer el mecanismo de adsorción de vapor de agua de los bioplásticos obtenidos a través de isothermas de adsorción.

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 GENERALIDADES DE LA YUCA

La yuca es un arbusto variable de altura, del que se pueden encontrar alrededor de 180 especies, siendo la más cultivada la *Manihot esculenta* (Montaldo Á., 1991). Esta planta alberga especies dulces y amargas, cuyas diferencias radican en su contenido de glucósido linamarina, que es el generador de ácido cianhídrico, y su contenido depende en parte de las condiciones ecológicas del cultivo; la yuca proviene del continente americano, señalando a Brasil como su posible país de origen. (Montaldo *et al.*, 1979).

De este arbusto se obtienen dos productos de alto valor nutritivo: la raíz, cuya estructura consta de tres partes, la película suberosa, la cáscara o corteza, y el cilindro central, donde se encuentran las células parénquimas llenas de almidón, siendo esto último lo que la hace rica en carbohidratos; y el follaje de la planta, que es uno de los materiales verdes con mayor riqueza proteica, además de poseer tres veces más grasa y el doble de fibra que la raíz (Montaldo *et al.*, 1979). La yuca es la cuarta fuente más importante de nutrientes energéticos, en el trópico y se utiliza con fines industriales y alimenticios para seres humanos y animales. Este cultivo tiene un alto potencial de rendimiento en buenas condiciones, y se ha estado usando como sustituto de la harina de cereales en productos de panadería, de igual modo se utiliza como cultivo energético, ya que está compuesta en su mayoría por carbohidratos, los cuales están presentes en forma de: monosacáridos, disacáridos y polisacáridos, unidos por enlaces glicosídicos (Whitten *et al.*, 2008), uno de éstos es el almidón, el cual se define como un polímero poli disperso, ya que se presenta de forma lineal y ramificada (Seymour y Carraher, 2002). La planta de yuca prospera en condiciones adversas manteniendo una producción continua (Kristensen *et al.*, 2014), motivo por el cual se ha convertido en un cultivo con altos potenciales para el uso en diferentes industrias, como los plásticos biodegradables.

2.1.1 Yuca industrial. Según la Food and Agriculture Organization (FAO,2013), la presencia de glucósidos cianógenos tanto en las raíces como en las hojas puede establecer el uso final de la yuca, vinculando el contenido bajo de estos glucósidos a las variedades “dulces”, que son destinadas a consumo en fresco, y el alto contenido de glucósidos cianógenos a las variedades “amargas”, ya que necesitan un pre-procesado para el consumo humano, es por esta razón que se atribuyen como variedades industriales, sin embargo el contenido de glucósidos puede variar dependiendo de las condiciones edafoclimáticas de la región cultivada, aunque la clasificación de las variedades según su aplicación final, es bastante precisa (Aristizabal y Sánchez,2007).

Una de las mayores preocupaciones atribuidas a la producción de yuca industrial, es el alza de precios de este alimento importante en la dieta colombiana, como se está viviendo con el maíz y la caña de azúcar, las cuales están ocasionando una crisis en la canasta familiar ya que son productos de alto impacto en la alimentación de la región. No obstante la yuca usada comúnmente para consumo humano en fresco, corresponde a variedades que no son apetecibles para su procesamiento industrial.

Variedades de yuca como la MPER-183, la cual se considera un clon que se ha adaptado muy bien en los valles y posee una resistencia o tolerancia a la bacteriosis (Camacho, 2000), necesita de un sustrato poroso, con un excelente drenaje y alto porcentaje de materia orgánica para su germinación (entre el 80-90%) y sostenimiento; esta variedad tiene un alto porcentaje en la producción de materia seca (alrededor del 32%) y el rendimiento en cultivo oscila entre 25-36t/ha (Fuenmayor *et al.*, 2012), esta variedad puede cultivarse en condiciones adversas ya que es una planta resistente y es por este motivo que se considera como un cultivo promisorio para su comercialización. A pesar de que esta especie se puede catalogar como dulce por su contenido de cianógenos menor a 50mg HCN/kg, no es muy comercializada para su consumo en fresco, pero si lo es para su uso en la alimentación animal gracias a su alto contenido de

proteína cruda en sus hojas, el cual oscila entre el 10% y 31% dependiendo de la densidad de siembra y el periodo de corte (Ortega y Valásquez, 1996).

Por otra parte, el almidón es el componente mayoritario de la harina de yuca, la cual está compuesta por proteínas, lípidos y fibras cuyos efectos podrían ser positivos en la elaboración de materiales bioplásticos, teniendo en cuenta que estas últimas potencian las propiedades mecánicas; además, la obtención de harina es menos costosa que la del almidón, por cuanto para la extracción de almidón se requieren procesos que demandan más tiempo y recursos hídricos principalmente (Pelissari *et al.*, 2013). Lo anterior promueve el uso de la harina de yuca en la fabricación de los bioplásticos tanto flexibles como semirrígidos.

El uso de materias primas derivadas de cereales y tubérculos, tienen un gran potencial en la utilización de polímeros termoplásticos gracias a su abundante disponibilidad, y la capacidad de producir materiales en condiciones específicas exhibiendo propiedades muy cercanas a las de otros plásticos sintéticos como lo son el poliestireno (Leblanc *et al.*, 2008), se pueden obtener un mayor rendimiento en la elaboración de estos plásticos biodegradables y una mayor compatibilidad con el ambiente (Lopattananon *et al.*, 2012) dado que el proceso de extracción de almidón de yuca es altamente contaminante porque genera aguas residuales con altos valores de DBO y DQO.

2.2 FIBRAS

Las fibras son estructuras unidimensionales con alto orden lateral, y fuerte interacción de cadenas adyacentes. Estas se clasifican en: fibras no celulósicas, que son polímeros sintéticos obtenidos a partir de productos químicos; fibras celulósicas, que se producen por la modificación química de polímeros naturales; y fibras naturales, las cuales se subdividen según su origen en: animales, como la lana y seda, minerales, como el asbesto, y vegetales, como el algodón, yute y cáñamo, estas dos últimas denominándose fibras industriales, ya que se utilizan en cuerdas, sogas, refuerzos para papel, esteras y cerdas (Wittcoff y Reuben,

2002).

Desde hace dos décadas se han venido estudiando las fibras naturales como alternativa a compuestos poliméricos clásicos reforzados, estas se han empleado tanto para matrices termoplásticas como en matrices termoestables, logrando aumentar las propiedades plásticas y de rigidez. La adición de fibras naturales a matrices termoplásticas ha tenido en ocasiones un mayor o menor acierto para el aumento de sus propiedades mecánicas, estas fibras tienen un gran poder de resistencia por si solas, fibras como el yute, cáñamo, sisal, plátano, algodón, lino, coco, bambú han proporcionado una condición de refuerzo aceptable gracias a su dureza, su forma, compatibilidad en la matriz polimérica y cantidad de fibra incorporada, esta última viene condicionada a la orientación y ordenamiento de estas fibras en la matriz (Amigó *et al.*, 2008).

2.2.1 Fibra de fique. El fique, que tiene por nombre botánico *Furcraea macrophylla spp.*, son plantas grandes de tallo erguido, cuyas hojas son de color verde, con una estructura larga y angosta, su forma es radial. Tienen su origen en América tropical, específicamente en la región andina de Colombia, Venezuela y Ecuador, donde se encuentran las condiciones climáticas apropiadas para su cultivo durante casi todo el año (Rueda y Aparicio, 2011).

En Colombia, el fique ha crecido espontáneamente, y es cultivado de forma sostenible por los indígenas y campesinos (Muñoz y Cabrera, 2007). El departamento del Cauca es el mayor productor de fique en Colombia, con una producción ascendente a 6056.1 t/año. La extracción de la fibra se realiza a partir de las hojas de la planta, la cual se despalma y se introduce en una desfibradora que separa la fibra del jugo y el bagazo. Seguido a esto, se remueven los residuos líquidos y sólidos que quedan adheridos a la fibra, y finalmente se dispone a secar (Velasco *et al.*, 2009).

El fique es una fibra dura por excelencia, y se desfibra para la fabricación de varios elementos, como alpargatas, redes, cuerdas, sacos para la exportación de

café, así como en la industria textil, para la producción de cortinería, geotextiles, entre otros. Esta fibra ha venido experimentando un proceso de expansión en el mercado, debido a su origen natural, al ser usada como materia prima para la producción de productos biodegradables, lo que la ha llevado a ser reconocida como un producto estratégico para el desarrollo agropecuario y agroindustrial en el país (Rueda y Aparicio, 2011).

2.3 ADITIVOS

Los aditivos se definen como sustancias adicionadas a diferentes materiales plásticos durante su producción, que tengan como propósito lograr un efecto técnico al producto final, estos productos pueden ser agentes anti espumantes, plastificantes, lubricantes, así como también sustancias que proporcionen un medio adecuado para la polimerización como lo son los agentes tenso activos (Mercosur, 2007).

Los aditivos en las matrices poliméricas promueven interacciones de cadena con los diferentes compuestos de esta, bien sea disminuyendo su higroscopicidad, aumentando las propiedades flexibles o disminuyendo la resistencia a la tensión lo cual puede ser benéfico o perjudicial en los compuestos. Materiales producidos a base de WPI (Proteína aislada de suero), fueron estudiados adicionando diferentes porcentajes de glicerol obteniendo un efecto positivo con la incorporación de estos agentes en la matriz ya que se promueve la plastificación de la misma disminuyendo las regiones cristalinas del compuesto y la aparición de grietas, lo que favorece sus propiedades de adsorción, sin embargo, este tipo de interacciones también promovieron un debilitamiento de las interacciones en la cadena produciendo un efecto negativo en las propiedades de tracción (Sothornvita *et al.*, 2007), esto también se ratifica en un estudio en el que se evaluó la adición de glicerol en bioplásticos elaborados con proteínas de trigo, demostrando un efecto significativo en las propiedades mecánicas y en los valores de transición vítrea, la cual disminuyó a medida que aumentó el porcentaje de plastificante, validando que la adición de este

componente promueve la plastificación más rápida del material (Sun *et al.*, 2008). Adicionalmente se ha reportado que el aumento en la concentración de sorbitol por encima del 20%, como componente de matrices termoplásticas de harina de yuca y carboximetil-celulosa, disminuyó los esfuerzos de tensión del material (Villada *et al.*, 2011).

En cuanto a la incorporación de otros aditivos en los bioplásticos, se ha evaluado el efecto de tensoactivos en la matriz termoplástica para la disminución del envejecimiento de películas a partir de almidón, glicerol y Span 40, 60 y 80. La aplicación de estos tensoactivos disminuyó la tensión superficial y la interrupción de la matriz amilácea ocasionando una reducción en su nivel de hidratación e incrementando la tortuosidad de la matriz al paso de las moléculas de agua, lo cual es un efecto positivo para el almacenamiento de estos materiales ya que produce una mayor estabilidad del biocompuesto (Ortega *et al.*, 2014).

2.3.1 Plastificante. Un plastificante es un material compatible con un polímero y lo reblandece o disminuye su fragilidad, estos funcionan solvatando los grupos polares de la cadena del polímero, debilitando así fuerzas intermoleculares de atracción entre cadenas adyacentes y ocasionando así que se separen aún más (Wittcoff y Reuben, 2002).

Se pueden encontrar tres tipos de plastificantes, los poliméricos que son más resistentes a la lixiviación con disolventes o detergentes para lavado, los secundarios lo cuales son útiles para reducir costos y no se pueden usar solos ya que comúnmente se utilizan para sustituir entre un cuarto y la mitad del plastificante primario y, los dilatadores que son aceites minerales incompatibles (Gray *et al.*, 2004).

La adición de agentes plastificantes provoca un debilitamiento de las fuerzas intermoleculares a lo largo de las cadenas poliméricas, lo que causa una disminución del esfuerzo tensil y un aumento en la flexibilidad del material, así como también reduce la viscosidad del fluido y disminuye la temperatura de

transición vítrea, lo cual puede modificar las propiedades mecánicas (Beltrán y Marcilla, 2012).

Según la definición de las normas ASTM un plastificante es un material que se incorpora a un plástico para facilitar su procesado y mejorar su flexibilidad o “distensibilidad”. Uno de los plastificantes que más abunda es el agua y en segundo lugar se encuentran grasas animales y vegetales (Seymour y Carraher, 1995) de donde se extrae el glicerol o glicerina, que es uno de los plastificantes más usados en la industria.

2.3.2 Surfactantes. Son agentes activos de la superficie que modifican la tensión superficial, que son absorbidos en la inter fase agua-aceite, formando un puente entre la fase polar y no polar haciendo que la transición entre las dos no sea muy súbita, lo que da a entender que al añadirse el surfactante a la mezcla, esta disminuye el ángulo de contacto y ayuda a desplazar la fase aérea de la superficie, reemplazándola por otra líquida (Manrique, 2014).

Los surfactantes también se pueden comportar como un agente solubilizante ya que tienen la capacidad de disolverse o dispersarse en un líquido, el cual se adsorbe en la superficie; esto ocurre siempre y cuando no exista un exceso ya que este permanecería en la superficie del líquido formando agregados moleculares coloidales, denominados micelas (Manrique, 2014).

Estos agentes se encuentran relacionados con fenómenos intersuperficiales tan importantes como la emulsificación, solubilización, dispersión, detergencia, adherencia y adsorción, por lo cual son ampliamente usados en diversos sectores industriales como por ejemplo: la industria de jabones, detergentes, plásticos, minería, explotación petrolera y pinturas, entre otros (Álvarez, 2004).

2.3.3 Lubricantes. Se incorporan para disminuir las fuerzas de rozamiento entre dos superficies, como en el caso de los plásticos. Se localizan entre el propio material o entre el fundido y las superficies metálicas de los equipos de

transformación. En el primer caso mejoran el flujo por reducción de la viscosidad del material durante el procesado y en el segundo reducen la adhesión con las paredes metálicas del equipo facilitando el paso del material por la maquinaria que se utiliza en el proceso. Existen dos grupos: los internos que lubrican los gránulos de polímero y los de otros aditivos durante el proceso de transformación permitiendo una fusión más fácil, y los externos que son inmiscibles ya que lubrican la mezcla para proteger la maquinaria usada en el proceso, de esta forma se evita en exceso de fricción que provocaría una temperatura demasiado alta y la degradación del material (Blanco, 2011). Las grasas o los aceites lubricantes también forman una película alrededor de los gránulos de almidón ayudando a obtener la mezcla sin grumos (Vaclavik, 2002). El uso de aceites vegetales en matrices termoplásticas confiere diferentes propiedades fisicoquímicas, comparables a las de los actuales polímeros; ya que estos en su estructura contienen varios tipos de ácidos grasos con distintas insaturaciones de cadena, las cuales se pueden entrecruzar a través de los sitios activos de la molécula otorgando resistencia mecánica y térmica. (Bueno, 2012)

2.4 PROCESO DE GELATINIZACIÓN

Algunas características funcionales del almidón son: solubilidad, capacidad de retención de agua, poder de hinchamiento y tendencia a la retrogradación, características que pueden afectar las propiedades mecánicas de un polímero elaborado con este polisacárido. Cuando el almidón es sometido a un tratamiento hidrotérmico, este sufre una serie de cambios en su estructura, que causan hinchamiento, hidratación, fusión y ruptura de los gránulos, lo que puede ayudar a mejorar sus propiedades de adsorción, durante este tratamiento los gránulos pasan por la fase de gelatinización, gelificación y retrogradación, Figura 1 (Aristizabal y Sánchez, 2007).

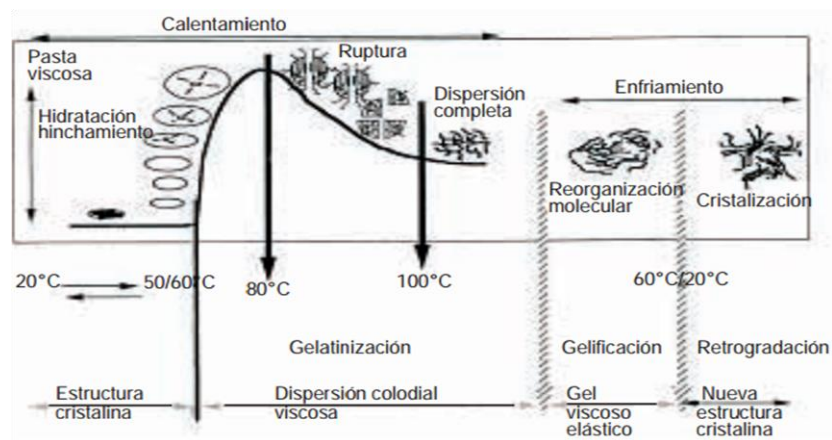


Figura 1. Cambio de los granulos de almidón frente a un proceso hidrotérmico.

Fuente: Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca; FAO; 2007.

La primera fase del tratamiento es la gelatinización, donde se produce un hinchamiento reversible de los granulos de almidón, formando una suspensión temporal de grandes partículas que no se disuelven en el medio que las rodea y se depositan en el fondo del recipiente con líquido, al acercarse cada vez más a la temperatura de transición vítrea, la cual es característica en cada almidón, como se describe en el Cuadro 1, el agua se incorpora en el granulo hasta que las partículas de amilosa se salen de este (Vaclavik,2002), produciendo un efecto irreversible y un aumento en la viscosidad de la mezcla, formando una suspensión en medio acuoso que se le atribuye el nombre de pasta o engrudo.

Cuadro 1. Temperatura de gelatinización en diferentes tipos de almidones.

Almidón	Temperatura de gelatinización (°C)
Arroz	61-78
Maíz	62-72
Papa	58-65
Yuca	52-65
Sorgo	68-75
Trigo	52-63

Fuente: Gelatinización y otras propiedades del almidón; Universidad Nacional de Misiones, 2013

Este proceso ocurre en un intervalo de temperatura limitado, lo cual induce a la

aparición de propiedades visco elásticas, gracias a la solubilización parcial de los polímeros y el hinchamiento del granulo, en este proceso desaparece la birrefringencia en donde las macromoléculas del almidón se disponen simétricamente.

La gelatinización conlleva a una pérdida de la estructura cristalina ordenada que se le llama la “desaparición” de la formación de la cruz de malta, en donde la pasta se vuelve más viscosa y resistente al flujo con el transcurso del tiempo en presencia de agitación y temperatura.

Para que el almidón se pueda procesar y formar un material bioplástico es necesario producir cambios en las fuentes, disminuyendo la región cristalina en la matriz lo cual produce efectos en las propiedades fisicoquímicas en el material, esto se puede verificar en estudios realizados en almidón de yuca y glicerol donde se encontró que la gelatinización produjo un cambio positivo en las propiedades mecánicas ya que esta favorece la resistencia a la tracción (Meneses *et al.*,2007) , por lo general esta gelatinización se produce durante el proceso de elaboración del bioplástico, cuando se usan técnicas de procesamiento que implican calor, presión y cizalla como la extrusión o el moldeo por inyección. No obstante, la técnica de termo-compresión no genera cizalla, por lo cual, la gelatinización y plastificación es mínima durante el procesamiento, evidenciándose en materiales poco plastificados con amplios espacios intersticiales en la estructura (Navia *et al.*,2013)

2.5 TÉCNICAS DE MOLDEO

Es un procedimiento mediante el cual se consigue que algún material adquiriera una forma, otorgando también una estructura y propiedades necesarias para su uso final, ya que aquí se produce la fundición del material, el cual al solidificarse adopta la forma de la cavidad. Este método se aplica básicamente para metales y plásticos, no ocasiona pérdida de material y se pueden obtener diferentes formas que son usadas en el campo de los empaques y recipientes (Degarmo *et*

al.,2002).

Existen varias técnicas de moldeo dentro de las cuales se destacan: extrusión, moldeo por inyección, moldeo por soplado, moldeo por compresión y termo conformado, como las más usadas en la industria plástica.

2.5.1 Extrusión. Consiste en hacer fluir el material plástico por un extrusor el cual consta de un cilindro que en su interior contiene un tornillo, sometiendo el material a un gran esfuerzo de cizalla y calor, estos dos factores producen la fusión y ablandamiento del material amorfo elevando la temperatura llevándola a un estado desordenado de las cadenas poliméricas (Blanco, 2005).

2.5.2 Moldeo por inyección. Esta es una de las técnicas más usadas en el procesado de polímeros y consiste en la inyección de un material polimérico fundido en un molde sellado y frío, dentro del cual se solidifica y forma un objeto mucho más preciso que el obtenido mediante otras técnicas, esta técnica utiliza altas temperaturas y presiones mucho más que en otro tipo de técnicas y sus piezas deben de someterse a un proceso de refinación para la eliminación de rebordes (Blanco, 2005).

2.5.3 Moldeo por soplado. Este es un proceso para productos huecos y consiste en expandir un material plástico derretido llamado "*Parison*" contra las paredes internas de un molde, esta técnica depende del material, el rendimiento requerido, el volumen de producción y los costos que se requieran pero es muy recomendado para polietileno, polipropileno, poliuretano, policloruro de vinil, politereftalato de etileno. Este puede ser continuo o discontinuo, y tiene dos etapas: la primera es la conformación de la preforma la cual se realiza por extrusión, esta preforma pasa a la segunda fase en la que se sopla con aire caliente dentro de un molde, en el cual la preforma toma su diseño (Rodríguez *et al.*, 2006).

2.5.4 Termo conformado. Este consiste en adecuar una lámina deformable a un molde, en este proceso se utiliza la temperatura para ablandar la lámina, la

cual por acción de presión se adapta a un molde específico, esta se deja enfriar y se endurece, produciendo piezas como vasos, envases o tapas. La presión aplicada en esta técnica es limitada, también permite la elaboración de piezas con un espesor y longitud muy pequeña, características que la hacen atractiva económicamente para las industrias de empaques ya que son piezas ligeras y de rápida confección las cuales pueden utilizar materiales relativamente económicos y a gran escala (Rodríguez *et al.*, 2006).

2.5.5 Moldeo por compresión. El moldeo por compresión es la técnica más antigua para la producción en masa de materiales poliméricos y se utiliza casi exclusivamente para moldear termoestables. Este proceso se realiza con dos platinas que emiten temperatura y presión y el molde (Figura 2), puede describirse de la siguiente forma:

- El molde se sujeta entre las platinas calientes de una prensa hidráulica
- Se coloca una cantidad preparada de compuesto de moldeo en el molde y esta se coloca en la prensa
- La prensa cierra con presión suficiente para evitar o minimizar la fuga de material en la división del molde
- El compuesto se reblandece y fluye para amoldarse al recipiente, aquí se produce el curado químico conforme a la temperatura
- La prensa se abre y se retira la pieza moldeada

Esta técnica de moldeo genera pocos desperdicios y debido a la baja orientación en las piezas moldeadas, los rellenos fibrosos se distribuyen bien y no se alteran en el proceso.

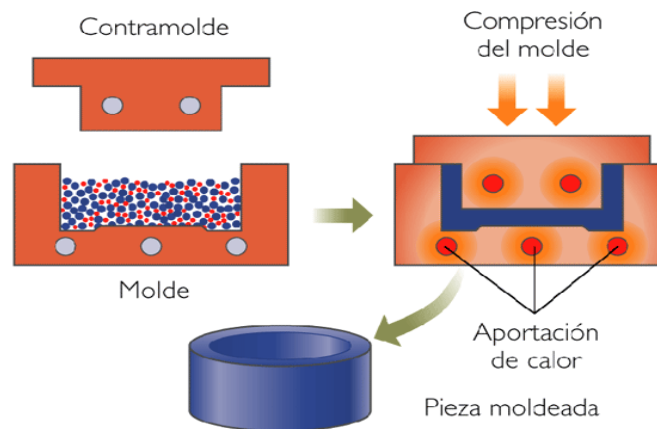


Figura 2. Moldeo por compresión
Fuente: Tecnología de los plásticos; 2011.

En la actualidad se han realizado estudios con diferentes técnicas de moldeo, como el moldeo por compresión, en la cual se pueden moldear materiales compuestos como por ejemplo matrices poliméricas reforzadas con fibras naturales.

Esta técnica se emplea en la elaboración de materiales provenientes no solo de almidón y sus derivados como semirrígidos de harina de yuca, sino también en la elaboración de bioplásticos a partir de proteínas como los obtenidos a partir de gliadinas y glicerol (Sun *et al.*, 2008).

Con esta técnica también se han obtenido films a partir de almidón de maíz, hidroxipropil-metilcelulosa, ácido cítrico y glicerol, obteniendo resultados promisorios en cuanto a sus propiedades mecánicas gracias a la formación de una estructura amorfa (Ortega *et al.*, 2014), films de almidón de yuca (Prakach *et al.*, 2013), bioplásticos a partir de albúmina y almidón de papa y maíz (González *et al.*, 2011), los cuales presentaron un mejor comportamiento mecánico y una transparencia aceptable demostrando que esta técnica fue eficaz frente a otras comparadas en el estudio citado.

2.6 ESTADO DEL ARTE

En la actualidad el término bioplásticos se usa para referenciar diferentes tipos de biopolímeros según su composición o su destino final. Una de las macromoléculas más utilizadas para la producción de plásticos biodegradables es el almidón, debido a su disponibilidad en productos como la yuca, que es altamente cultivada a nivel mundial y a bajo costo (Merchan, *et al.*, 2009).

En Colombia, la yuca representa seguridad financiera, debido a su adaptabilidad y alto rendimiento en condiciones extremas, por lo general se utiliza de manera natural como base en la alimentación diaria, ya que es un cultivo con alto valor energético gracias a su alto contenido en carbohidratos, además sus hojas tiene un importante contenido proteico lo que la hace apetecible para su uso en alimentación animal.

El almidón, el cual es el componente mayoritario de la harina de yuca tiene una densidad superior a la mayoría de polímeros termoplásticos convencionales y presentan baja resistencia a disolventes y aceites. Por su estructura de polisacárido, ofrece propiedades moderadas de permeabilidad al oxígeno y en general, buenas propiedades de barrera a los gases. Sin embargo, este material es muy sensible a la humedad y al contacto con agua, lo que limita sus características funcionales y el rango de sus aplicaciones en el sector industrial (REMAR, 2011). Las interacciones entre el agua y los biopolímeros son de gran importancia por su influencia en el comportamiento y propiedades del material, como el esfuerzo mecánico y estabilidad en el almacenamiento (Navia, *et al.*, 2011).

Existen algunas investigaciones relacionadas con este campo trabajo, las cuales fueron revisadas para el desarrollo del presente proyecto, que se mencionan a continuación.

Se han estudiado los biocompuestos a partir de harina de arroz y glicerol reforzados con fibras de sisa, y otros compuestos a partir de la mezcla de harina

de arroz y yuca, obtenidas por extrusión y moldeo por compresión, los cuales mostraron una mayor resistencia a la tensión y flexión con respecto a materiales provenientes de los almidones (Lopattananon *et al.*, 2009). También, se ha trabajado en la adición de fibra en una matriz termoplástica, como en semirrígidos a partir de harina de yuca y fibra de fique, donde se observó un aumento de las propiedades mecánicas al incorporar la fibra a la mezcla (Navia *et al.*, 2013).

En el desarrollo de otros materiales, se han realizado trabajos con fibras naturales, tales como el lino, y las procedentes de palma datilera, en una matriz termoplástica de almidón, las cuales presentaron una mayor tracción y disminución de la densidad en el material. Estas fibras han incursionado en el mercado de los bioplásticos, ya que son un excelente sustituto de las fibras sintéticas, y presentan una buena adhesión a la matriz mejorando notablemente sus propiedades mecánicas, además, retrasan la rápida biodegradación y la adsorción de agua, lo cual es uno de los principales puntos a desarrollar (Ibrahim *et al.*, 2014).

En otro estudio realizado por *Kaewtatip y Thongmee, 2013*, se propone el mejoramiento de las limitaciones de adsorción de vapor de agua en polímeros a base de almidones, tales como en películas a base de almidón pre-gelatinizado de yuca, almidón reticulado y glicerol. En los resultados obtenidos, se presentaron mejoras en la absorción de agua de las muestras debido a una mayor disponibilidad de interacción de la amilosa con otros componentes, lo cual propicia una disminución en las interacciones de los grupos hidrofílicos de estos, al mismo tiempo que se presentó una reducción en los puntos activos de adsorción. El desempeño, procesabilidad y costos son los mayores desafíos para los polímeros biodegradables para ser efectivos y cumplir las funciones requeridas durante su vida útil y disposición final del producto, dónde el empaque plástico basado en petróleo será paulatinamente reemplazado (Navia, 2011).

3. METODOLOGÍA

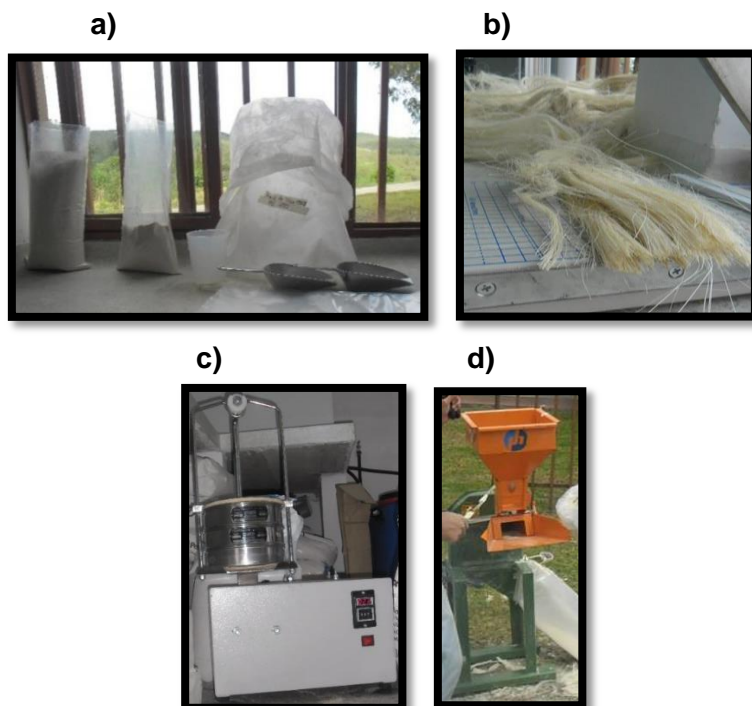
3.1 MATERIAS PRIMAS

3.1.1 Harina de yuca. Para el desarrollo de esta investigación se trabajó con harina integral de yuca variedad MPER-183 (Figura 3a), proveniente del departamento del Cauca (Colombia), la cual fue sometida a procesos de limpieza, trituración y molienda en la rallandería “La Agustina” (Mondomo, Cauca) tal como se muestra en la Figura 4.

3.1.2 Fibra de fique. La fibra extraída de las hojas de fique (*Fucraea sp*), fue adquirida en la Cooperativa Agropecuaria de Paniquitá Ltda. (Cauca, Colombia), y fue sometida a procesos de reducción de tamaño manual (Figura 3b) y molienda en un molino de martillos/cuchillas (Penagos, Tp8) (Figura 3d) y fue tamizada en un tamizador eléctrico, con un juego de tamices ASTM-11 ($\leq 250\mu\text{m}$) (Figura 3c)

3.1.3 Plastificante. El plastificante usado en la elaboración de estos bioplásticos fue glicerol USP comercial con una pureza del 99.0% obtenido de la empresa Sigma Aldrich y agua un plastificante universal.

3.1.4 Aditivos. Los aditivos usados en la elaboración de las muestras fueron Tween™ 80 (polisorbato 80, polioxietileno-20-monooleato de sorbitán), de la empresa Fisher Scientific referencia BP338-500 y aceite de oliva de origen español, extra virgen, marca Olivetto (Navia, *et al.*, 2011)



A) Harina de yuca MPER-180; b) Fibra de fique; c) Molino de martillos/cuchillas TP8; d) Tamizador eléctrico

Figura 3. Insumos usados para la elaboración de las muestras

Fuente: Autor

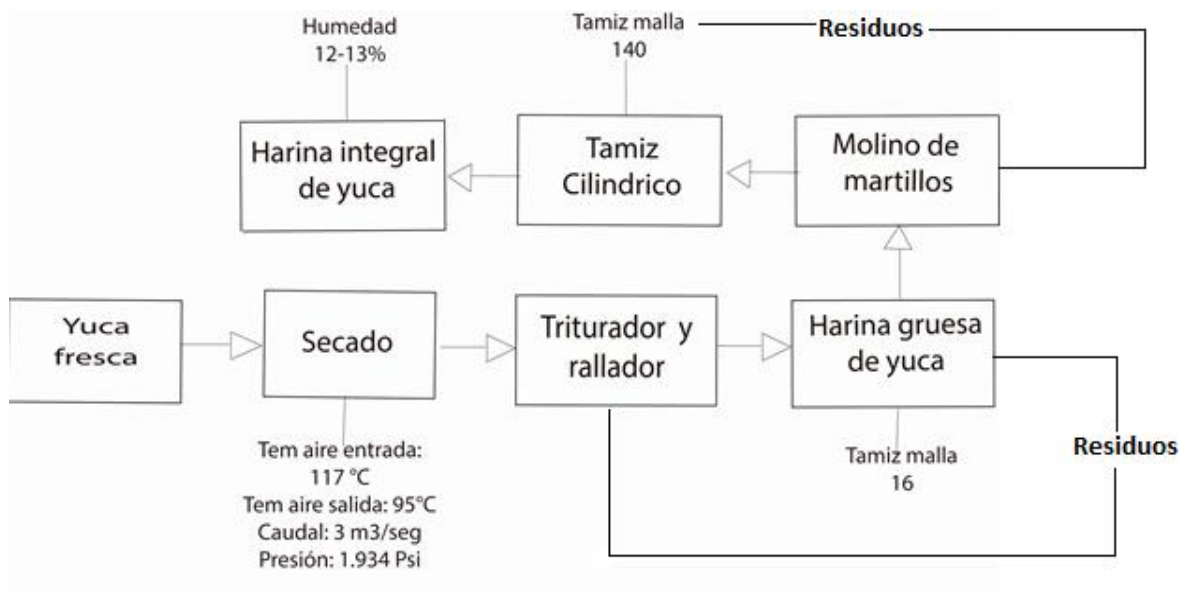


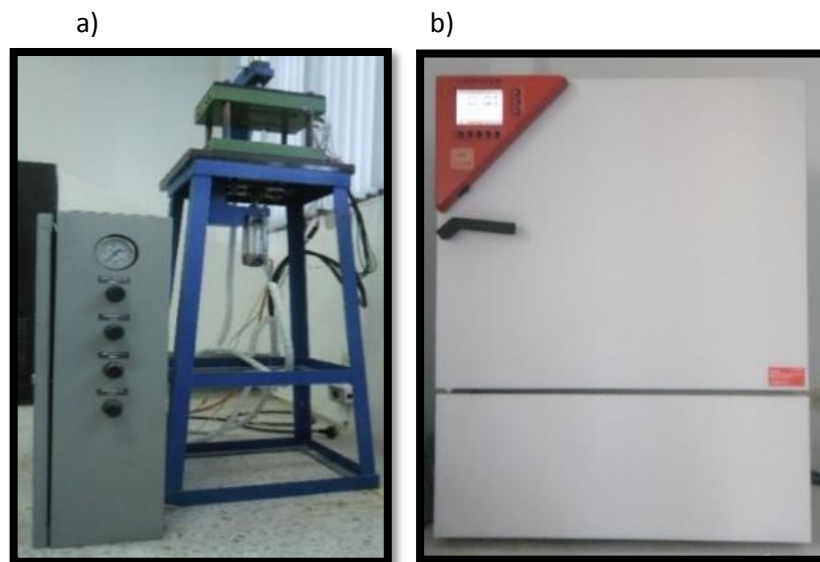
Figura 4. Proceso elaboración harina integral de yuca.

Fuente: Autor

3.2 ELABORACIÓN DE LOS BIOPLÁSTICOS.

Se realizaron suspensiones de harina de yuca (30% p/p) en agua, las cuales se sometieron a un baño termostático por 15 minutos a una temperatura de 75-80°C hasta su gelatinización, la cual se realizó para garantizar una mejor plastificación del material, posteriormente se adiciona la fibra, plastificante y aditivos (surfactante-lubricante) en una proporción de 60%(harina gelatinizada), 25%(fibra), 7.5%(glicerol) y 7.5%(aditivos) agitando constantemente hasta obtener una masa homogénea y moldeable cuya humedad promedio fue 40% en base húmeda.

Finalmente se realizó la termo-compresión, adicionando $15 \pm 0,2$ g de la mezcla en cada probeta, en una prensa neumática (Plasmega, Colombia) (Figura 5a), durante 5 min y según las condiciones planteadas en el diseño experimental. Una vez obtenidas, las probetas fueron almacenadas en una cámara climática (Binder, 115-720I) (Figura 5b), a $23 \pm 1^\circ\text{C}$ y 50 ± 5 % de humedad relativa durante 10 días, según la normas ASTM D618 (2011)



A) Prensa neumática; b) Cámara climática
Figura 5. Equipos usados para la elaboración de las muestras.
Fuente: Autor

3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se evaluó el efecto de la presión y temperatura de compresión sobre las propiedades mecánicas, color, densidad e isothermas de adsorción de los bioplásticos elaborados a partir de harina de yuca, fibra de fique, plastificante y aditivos, aplicando un diseño factorial 3^k (k: factores) como se muestra en el Cuadro 2 para un total de 9 tratamientos, se realizaron 7 réplicas para pruebas mecánicas, 3 para isothermas, 3 para color y 6 para densidad. Los valores de los niveles y factores fueron determinados con base en investigaciones de uso de harina de yuca nativa en la elaboración de semirrígidos (Navia *et al.*, 2013).

Antes de efectuar las corridas experimentales, se realizaron pruebas preliminares, en las cuales se determinó el tamaño de partícula del fique usado en el desarrollo de este trabajo ($\leq 250\mu\text{m}$).

Cuadro 2. Diseño experimental

Factores	Niveles	Variables de respuesta
Temperatura (°C)	180	Propiedades mecánicas: tensión y flexión Color Densidad Isothermas de adsorción
	190	
	200	
Presión (psi)	0	
	20	
	40	

Fuente: Autor

Cuadro 3. Codificación de los tratamientos

Tratamiento	Temperatura (°C)	Presión (psi)
A	180	0
B	180	20
C	180	40
D	190	0
E	190	20
F	190	40
G	200	0
H	200	20
I	200	40

Fuente: Autor

3.3.1 Análisis estadístico. Los datos arrojados en las pruebas mecánicas, densidad, color e isotermas se analizaron con el programa SPSS versión 20 (2004), mediante un análisis de varianza a un nivel de confianza del 95% y prueba de tukey para la comparación de medias.

3.4 PRUEBAS MECÁNICAS

Las muestras de cada uno de los tratamientos realizados, fueron evaluadas en un texturómetro (EZ- Test I, Shimadzu, Japón), equipado con una celda de carga de 500 N .Se realizaron las pruebas de tensión y flexión siguiendo los lineamientos de las normas ASTM D638 (2010) para tensión y ASTM D790 (2010) para flexión. Se utilizó el software Trapezium X para el procesamiento de los datos y resultados en cada prueba.

3.4.1 Prueba de tensión. Cada una de las muestras se ubicó de manera vertical sujetándose con las mordazas en los extremos (Figura 6). Posteriormente el cabezal superior ascendió a una velocidad de 1mm/min hasta detectar la fractura de la muestra. Este procedimiento se realizó en 7 muestras por tratamiento. El software proporcionó los resultados de σ_T (Esfuerzo de tensión) y E_T (Modulo tensión).



Figura 6. Forma de ubicar la probeta en el equipo: Tensión
Fuente: Autor

3.4.2 Prueba de flexión. Para el desarrollo de la prueba de flexión en tres puntos las muestras fueron ubicadas horizontalmente en el equipo (Figura 7) alineando la muestra con el centro de los dispositivos superior e inferior, posteriormente el cabezal superior descendió a una velocidad de 1mm/min hasta detectar la fractura de la muestra. Este procedimiento se realizó en 7 muestras por tratamiento. El software proporcionó los resultados de σ_F (Esfuerzo de Flexión).



Figura 7. Forma de ubicar la muestra en el equipo: flexión
Fuente: Autor

Los valores de E_f (módulo de young) de flexión fueron calculados manualmente según la norma ASTM D 790-2010 usando la Ecuación 1:

$$E_f = \frac{L^3 * m}{4 * b * d^3} \text{ (Ecuación.1)}$$

$$L = 4 * d \text{ (Ecuación.2)}$$

Dónde: L; soporte inferior (mm) y se calculó mediante la ecuación 2,

M; es la pendiente de la gráfica donde se relaciona la fuerza máxima con el máximo desplazamiento,

B; es el ancho promedio de las probetas (mm),

D; es el espesor promedio de las probetas (mm),

Estas últimas mediciones se realizaron con un paquímetro digital (Mitutoyo, Absolute, Brasil).

3.5 PRUEBAS DE COLOR Y DENSIDAD

3.5.1 Color. Se determinó el color a 5 muestras de cada uno de los tratamientos, tomando las mediciones sobre las caras superficiales de las muestras en 3 puntos diferentes, utilizando un colorímetro (CM-600D, Konica Minolta Optics Inc., Japón), en el cual se usó como referencia el iluminante d65 con un observador de 10° (Figura 8). El resultado para cada tratamiento fue el promedio de las mediciones en cada muestra.

El color de las muestras se determinó por medio de una luz definida que se refleja en la superficie de la misma, dando un espectro resultante valorado en la escala CIELAB: L, a*, b*; en donde L=0(negro), hasta L=100(blanco); a* = -60(verde), hasta a* = +60(rojo); y b* = -60(azul), hasta b* = +60(amarillo).



Figura 8. Colorímetro CM-600d; Konica Minolta Optics Inc.
Fuente: Autor

3.5.2 Densidad. Se determinó la densidad a 10 muestras por cada tratamiento, por el método geométrico, el cual relaciona el peso de la muestra con su volumen, los datos reflejados, son valores promedio en cada tratamiento; esta prueba se ejecutó usando una balanza analítica (Ohaus, PA214C, USA) (Figura 9).



Figura 9. Balanza analítica Ohaus, PA214C

Fuente: Autor

3.6 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Los valores de adsorción de las muestras fueron obtenidos por el método gravimétrico, para lo cual se emplearon siete soluciones salinas saturadas de cloruro de litio, acetato de potasio, carbonato de potasio, bromuro de sodio, cloruro de sodio, cloruro de potasio y sulfato de potasio, con actividades de agua que variaron desde 0.12 hasta 0.98. Las muestras de 2 cm de ancho, 2 cm de largo y 3.5 mm de espesor fueron ubicadas en recipientes de vidrio herméticamente sellados que contenían las soluciones salinas (Figura 10), posteriormente fueron almacenados a 23°C, 2, por 25 días. Las muestras fueron pesadas previo al inicio de la prueba y pasados los 25 días, en balanza analítica (Ohaus, PA214C, USA), obteniendo así un valor promedio del contenido de humedad en equilibrio (CHE) de cada tratamiento.



Figura 10. Desecadores para prueba de adsorción.

Fuente: Autor

3.6.1 Modelación matemática. Para ajustar los valores de CHE experimentales se emplearon 6 modelos matemáticos (Cuadro 4), mediante regresiones no lineales usando el programa Polymath 6.0 (2004). Para identificar el modelo de mejor ajuste se empleó el error medio relativo (MRE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) (Ecuaciones 3 y 4):

$$MRE(\%) = \frac{100}{N} \sum \frac{Me - Mp}{Me} \text{ (Ecuación.3)}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Xexp - Xcal)^2} \right] \text{ (Ecuación.4)}$$

Donde $Me - Mp$ Y $Xexp - Xcal$ corresponden a los valores de contenido de humedad experimental y predicha por cada uno de los modelos, n al número de valores experimentales,

Un modelo se considera aceptable cuando el valor obtenido de MRE es inferior al 10%.

Cuadro 4. Modelos matemáticos de ajuste por encima de 0.9

Modelo	Ecuación
Gab (Van den Berg 1985)	$m = \frac{m_0 C a_w}{[(1 - k a_w)(1 - k a_w + C k a_w)]}$
Smith (Smith, 1947)	$m = A + B * \ln(1 - a_w)$
Oswin (Oswin, 1946)	$m = a \left(\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right)^b$
Peleg (Peleg, 1993)	$m = k_1(a_w)^{n_1} + k_2(a_w)^{n_2}$
Hederson (Henderson, 1952)	$m = \left(-\frac{\ln(1 - a_w)}{A} \right)^{1/B}$
Caurie (Caurie, 1970)	$X = \exp(a + b a_w)$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas en los materiales son aquellas que influyen en el comportamiento del mismo al aplicar una fuerza; por lo general, se expresan en función del esfuerzo, de la deformación o de ambas. Las propiedades catalogadas como fundamentales son la resistencia, rigidez, elasticidad, plasticidad y capacidad energética. En esta investigación se evaluó la resistencia de los bioplásticos en términos de esfuerzo y modulo elástico o módulo de *young*.

La resistencia se mide por el esfuerzo al cual la muestra desarrolla alguna situación limitante, como el esfuerzo a la ruptura, que se define en términos de fuerza por unidad de área (MPa), el esfuerzo puede provenir de tres clases, esfuerzo tensivo, compresivo y de corte. La rigidez tiene relación con la deformación relativa de un material bajo los efectos de una fuerza aplicada, entre mayor sea el esfuerzo requerido para producir dicha deformación el material es más rígido; el módulo de *young*, también se define en términos de fuerza por unidad de área (MPa) (Universidad Nacional de Colombia, 2000).

En el Cuadro 5 se muestran los resultados promedio de cada tratamiento de las pruebas de flexión y tensión, lo cual refleja una tendencia a la disminución de las propiedades en relación con el incremento de la temperatura y presión.

En las Figuras 11 y 12, se hace una comparación del módulo elástico y el esfuerzo máximo promedio obtenidos en las dos pruebas realizadas en cada tratamiento.

En la figura 11 se observa que el aumento de la presión y temperatura ocasionan el mismo efecto que en la flexión; las propiedades de σ_f y E_f

disminuyen de acuerdo al aumento de temperatura, sin embargo alrededor de los 200°C se aprecia una estabilización del esfuerzo observándose una baja variación en estos valores, al aumentar la presión.

Cuadro 5. Resultados obtenidos en las pruebas mecánicas

Tratamiento	Esfuerzo tensión(MPa)	Módulo tensión(MPa)	Esfuerzo flexión (a)	Módulo flexión(MPa)
A	1.752 ^b	448.237 ^b	4.794 ^a	307.0575 ^a
B	1.85 ^a	453.679 ^b	4.775 ^a	306.6934 ^a
C	1.529 ^c	411.654 ^c	4.201 ^d	217.4896 ^c
D	1.87 ^a	515.87 ^a	4.753 ^a	250.7603 ^b
E	1.814 ^a	511.557 ^a	4.711 ^a	257.4465 ^b
F	1.593 ^c	417.337 ^c	3.96 ^d	217.1555 ^c
G	1.434 ^d	421.411 ^c	4.538 ^b	249.0035 ^b
H	1.733 ^b	473.866 ^b	4.633 ^b	259.1989 ^b
I	1.26 ^d	370.01 ^d	4.451 ^c	212.6172 ^c
Control*	1.492	290.9431	3.007	215.092

Letras diferentes minúsculas en superíndice indican diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$)

* Elaborado con harina nativa de yuca bajo las condiciones de proceso del tratamiento a.

Fuente: Autor

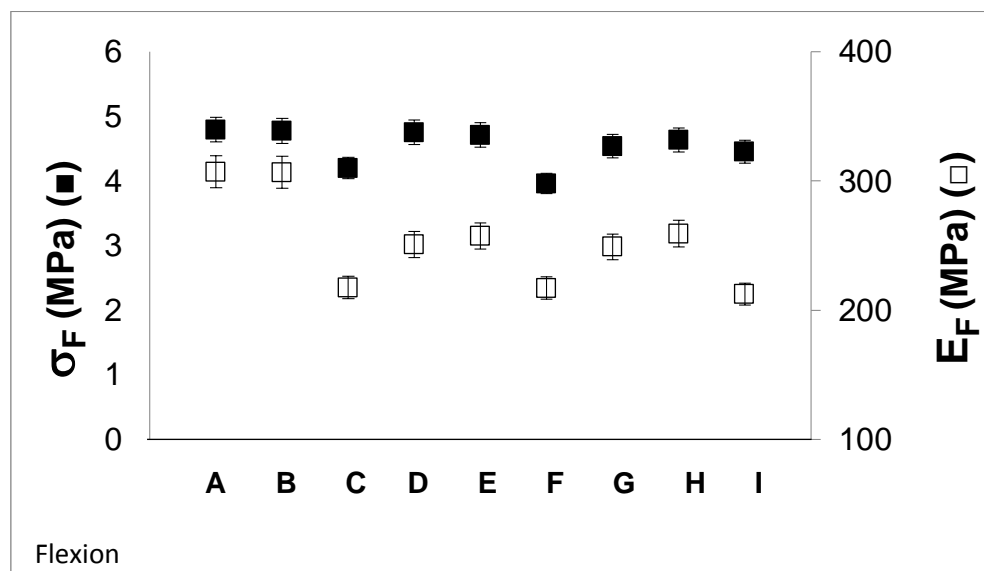


Figura 11. Pruebas mecánicas: Flexión
Fuente: Autor

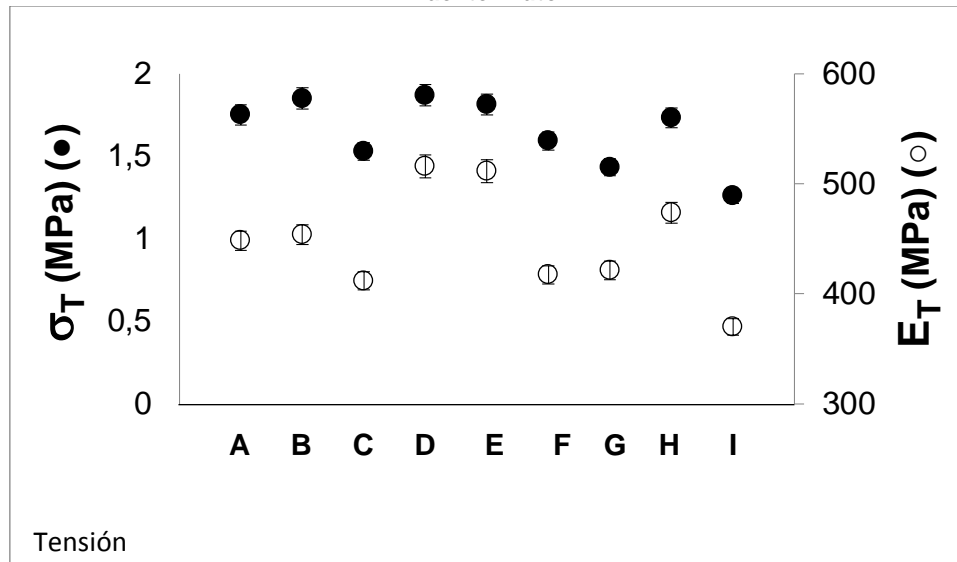


Fig. 12. Pruebas mecánicas: Tensión
Fuente: Autor

En la figura 12 se aprecia el efecto de la presión y temperatura sobre las propiedades de σ_t y E_T las cuales van decreciendo a mayores presiones y temperaturas; esto se puede atribuir a la interacción de lípidos-proteínas en la matriz termoplástica, lo cual ocasiona la formación de enlaces disulfuro por la desnaturalización de la proteína y la interacción por medio de enlaces hidrofobicos de los lípidos, lo cual debilita las fuerzas existentes en la matriz disminuyendo sus propiedades mecánicas; por otra parte, se podría inferir que el efecto de la presión y temperatura simultáneamente puede causar aglomeraciones en la matriz termoplástica, las cuales no favorecen las respuesta mecánica del material, ya que absorben la capacidad de resistencia del material haciéndolo más frágil.

Otros estudios han reportado valores de σ_t en películas de metilcelulosa a base de almidón-hidroxipropilado y glicerol, moldeadas con una temperatura de 160°C y presión de 435.114 psi , obteniendo valores entre 8 y 10 MPa (Ortega *et al.*, 2014), por otra parte, en películas a base de almidón pre-gelatinizado de yuca, almidón reticulado y glicerol moldeados a temperatura de 160° c y 2844 psi de presión, presentando valores de E_T de 1.48 MPas (Kaewtatip y Thongmee,

2013), que como se puede inferir, tienen valores inferiores a los obtenidos en este estudio.

Un aumento o disminución de temperatura a la cual se lleve a cabo la prueba puede tener un efecto drástico en las propiedades mecánicas, que al sobre pasarse provoca un cambio significativo en la flexibilidad del material, pasando de un material flexible a uno frágil (Burgos, 2013), tal como lo reporto Navia (2013), con muestras obtenidas a partir de harina de yuca donde se obtuvieron valores de esfuerzo de tensión de 1.805 ± 0.2 MPas y flexión de $3,5 \pm 0.2$ MPas con una temperatura de 200°C , los cuales fueron menores a los obtenidos en este trabajo.

Algunos investigadores han reportado que el incremento de la temperatura en el procesamiento de la matriz polimérica puede llegar a disminuir los valores de resistencia a la flexión gracias a la degradación proteica de la matriz, ya que esta fracción produce aglomeraciones o grumos de estas proteínas contenidas en la matriz y la separación del almidón gelatinizado, lo que produce cambios en la estructura y la formación de puntos de concentración en los que la muestra tiene una mayor resistencia causando una disminución de sus propiedades (Gonzales *et al.*, 2011).

En comparación con los bioplásticos elaborados en condiciones similares de procesamiento con harina de yuca de la misma variedad sin gelatinizar cuyos valores de σ_f , E_f y σ_t , E_T son de 3.007, 315,092, 1,49 y 290,94 MPa respectivamente, se evidencia un efecto positivo de la gelatinización de la harina de yuca, lo cual se produce por los cambios en las propiedades del almidón debidas al proceso de hidrotérmico, en donde la elevación de la temperatura causa un rompimiento de las cadenas de amilopectina haciendo que el almidón tenga una estructura amorfa, propiciando mayor disponibilidad de interacción con los componentes de la matriz y fortaleciendo probablemente la formación de puentes de hidrogeno con la fibra, glicerol y surfactante, lo que

consecuentemente puede favorecer su resistencia mecánica (Benitez, 2008).

Al realizar el análisis de los datos obtenidos en el programa SPSS 2.0 (2011) puede identificarse que la presión y la temperatura, al igual que la interacción de ambas, tienen efecto sobre las propiedades mecánicas de los materiales ($p < 0.05$) (Anexo A). Los valores más altos en las propiedades evaluadas fueron σ_t : tratamiento "D", E_T : : tratamiento "D", σ_f : tratamiento "A", y E_F : tratamiento "A", no obstante, la prueba de comparación de tukey estableció la homogeneidad entre los tratamientos agrupados así: σ_t : tratamientos "B,D Y E", E_T : tratamientos "D y E", σ_f : tratamientos "A, B, D y E", E_F : tratamientos "A Y B" en síntesis, los resultados óptimos comunes para tensión fueron presentados por los tratamientos D y E mientras que A y B lo fueron para flexión.

4.2 COLOR

Las propiedades colorimétricas de los materiales plásticos, son relevantes en relación con el consumidor, ya que este puede aceptar o rechazar el envase según su aspecto (Khoshgozaran *et al.*, 2012). Se observa una tendencia en la disminución de los valores de color con respecto al aumento de la presión y temperatura en los tratamientos, indicando que el incremento de la presión y temperatura no favorecen al color de las muestras ya que se puede observar una disminución de la luminosidad, y una tendencia a obtener muestras oscuras.

En la figura 13, se aprecia un descenso en la luminosidad de las muestras a mayor presión y temperatura, dando como resultado bioplásticos más oscuros y probablemente de menor agrado para el consumidor; este efecto puede deberse a la transmisión de luz a través del semirrígido, la cual depende de las partículas hinchadas en los gránulos, ya que al hincharse estas partículas la luz puede transmitir por los gránulos en lugar de ser reflejada; al aumentar la presión y temperatura estos gránulos pueden ser forzados y causar la reticulación del almidón afectando la transmisión de luz a través del granulo de almidón y

disminuyendo su luminosidad, dado que se genera una disociación de las cadenas y se reduce la hinchazón de los gránulos de almidón (Cui *et al.*, 2014). Este fenómeno se puede corroborar con lo observado en las Figuras de a^* y b^* donde las muestras a medida que aumenta la temperatura y la presión tornan más rojizas y con tendencia a disminuir el color amarillo.

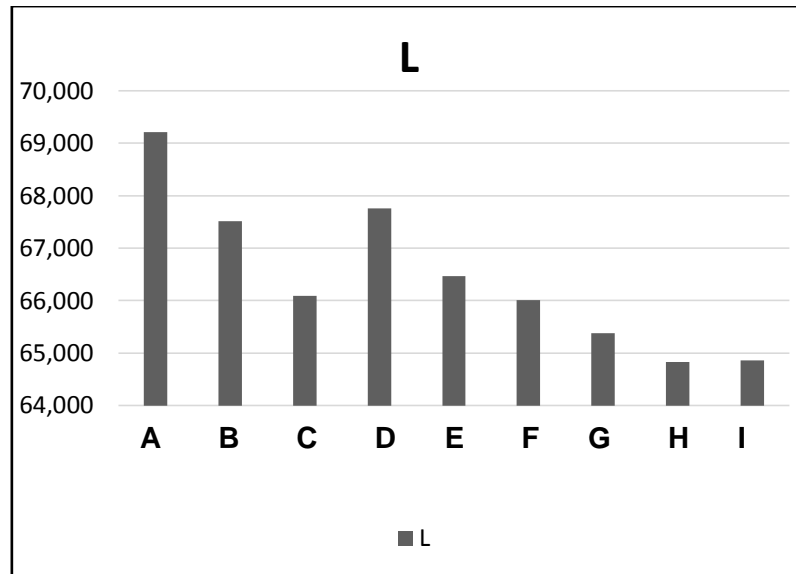


Figura 13. Luminosidad
Fuente: Autor

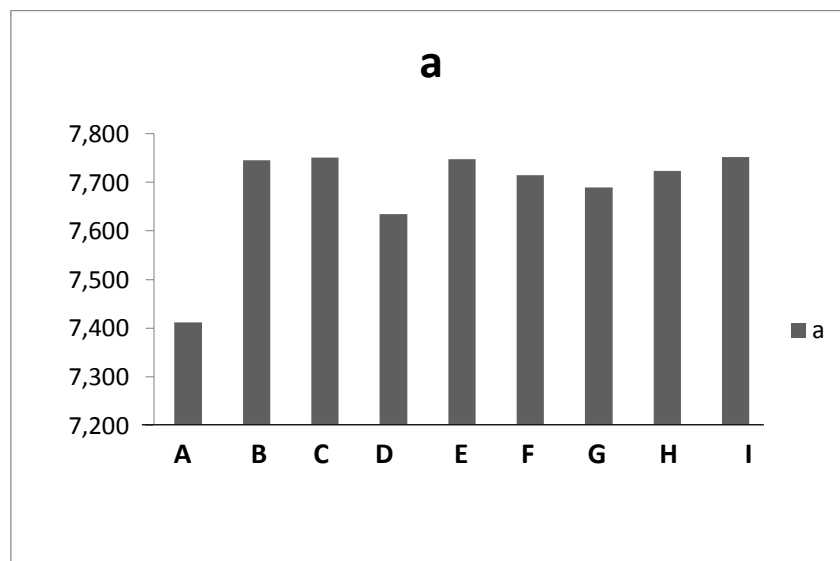


Figura 14. Parámetro
Fuente: Autor

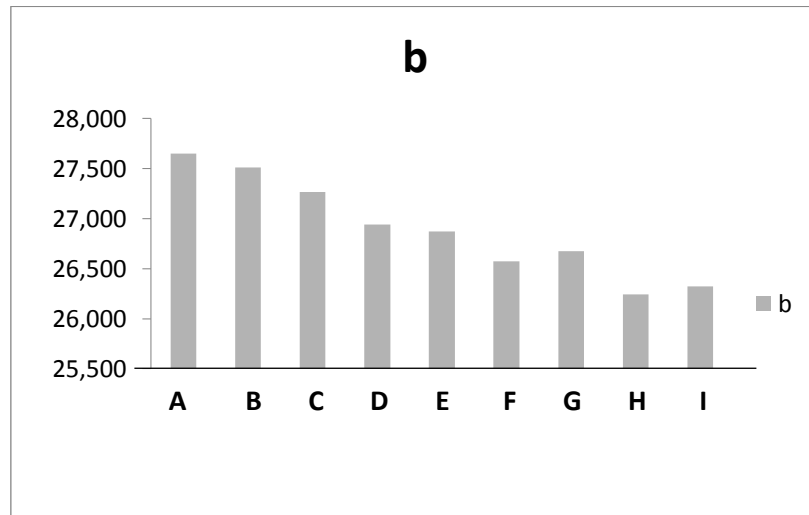


Figura 15. Parametro
Fuente: Autor

La inclusión de fibras a matrices termoplásticas puede provocar un cambio significativo en el color de los bioplásticos, lo que puede limitar su uso en embalaje de alimentos, como lo demuestra Debiagi (2011) en espumas a base de almidón, alcohol poli vinílico, quitosano y fibras extraídas de la caña de azúcar donde los valores *b tuvieron una influencia significativa al incorporar la mayor proporción de fibra; estos valores estaban entre 4 y 14, valores de a* entre 0 y 8, y valores de l entre 29 y 48 (Debiagi *et al.*, 2011), esto también lo comprueba Fama (2009) en materiales compuestos a base de almidón y fibras vegetales donde los parámetros de color sufrieron un mayor incremento al adicionar salvado de trigo a la mezcla, obteniendo valores de *b entre 26 – 85; al comparar estos valores con los obtenidos en este estudio se observa que la fibra de fique no causa una reacción negativa en el material.

Al realizar el análisis de los datos obtenidos en el programa SPSS 2.0 (2011) se estableció que la temperatura, presión e interacción entre ambos factores influenciaron significativamente ($p < 0,05$) los valores de L* de los bioplásticos, siendo la temperatura el factor de mayor efecto versus la presión. Sin embargo, solo el factor temperatura presento efecto significativo ($p < 0,05$) sobre a* y b*.

Asimismo, se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos para el parámetro L^* ($p < 0,05$), mientras que a^* y b^* no presentaron diferencias ($p > 0,05$) (Anexo C). La prueba de comparación de medias de Tukey agrupo los tratamientos en tres subconjuntos para L^* : (A); (B hasta F) y (G hasta I).

4.3 DENSIDAD

La figura 16 representa el comportamiento de la densidad de los tratamientos; puede notarse un incremento de la densidad a medida que se incrementa la presión y temperatura, al realizar el análisis de los datos obtenidos en el programa SPSS 2.0 (2011) puede identificarse que la presión, la temperatura y la interacción de ambas, tienen efecto sobre las propiedades de densidad de los materiales ($p < 0,05$) (Anexo B.), todas estas muestras presentaron diferencias significativas concluyendo que el tratamiento A fue el más apropiado.

Para argumentar lo anterior, se considera que al aplicar altas temperaturas a un material con un alto contenido de líquido, este aumentará la fracción de moléculas con energía suficiente para desprenderse de las moléculas con que interactúa, lo que conlleva a una disminución de la fase líquida y un aumento de vapor, el cual al incrementar, la presión en el proceso de compresión promueve la formación de poros y espacios intersticiales en la estructura del material, favoreciendo la expansión y disminuyendo su densidad (Aldabe *et al.*, 1999), en este caso al aplicar altas temperaturas y aumentar la presión se disminuye el punto de ebullición de la fase líquida evitando un aumento de vapor y aumentando su densidad.

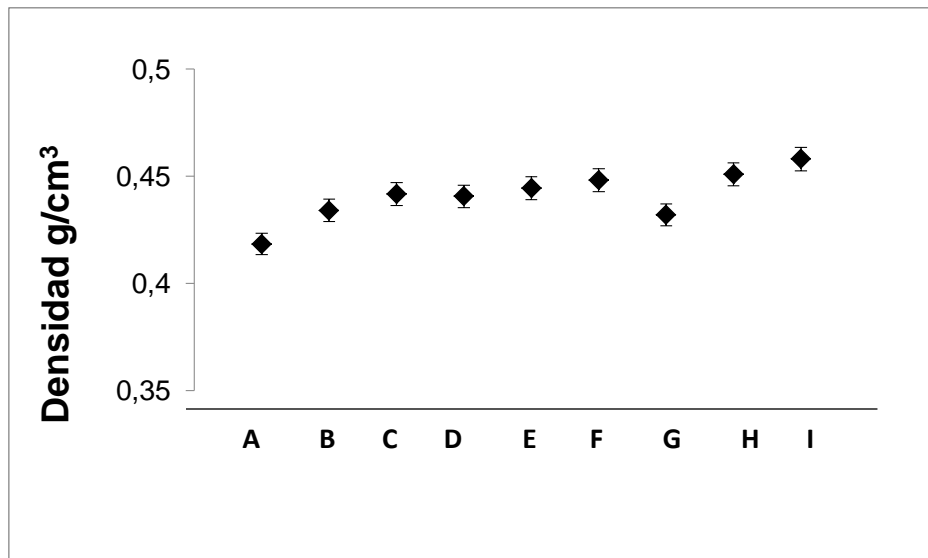


Fig.16. Comportamiento densidad

Fuente: Autor

Por su parte, los surfactantes favorecen el efecto espumante en la matriz polimérica, ya que estos compuestos son capaces de migrar hacia la zona de separación de las fases líquida y gaseosa, beneficiando la disminución de la tensión superficial (Rodríguez *et al.*, 2012).

Esta característica es una de las más importantes ya que como se menciona en el párrafo anterior la interacción entre la temperatura (baja) y la presión (baja) causan un efecto de expansión del material, implicando usar menor cantidad de materia prima para formar el material, reduciendo costos en la producción para ganar competitividad frente a otros materiales convencionales como el poliestireno expandido, cuya densidad está aproximadamente entre 0.05-0.09g/cm³, polipropileno cuya densidad oscila entre 0.90-0.910 g/cm³ y polietileno de baja densidad, la cual oscila entre 0.910-0.930 g/cm³; y otros bioplásticos a partir de almidón de yuca el cual presenta una densidad de 1,05 g/cm³ (Meneses *et al.*, 2007)

4.4 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Para la mayoría de los compuestos secos existe un contenido de agua tan bajo que la pérdida de calidad durante su almacenamiento corresponde al valor de la

monocapa, este es interpretado como el total de adsorbente con enlace físico requerido para revestir una superficie (Álvarez *et al.*, 2010), la monocapa de adsorción se encuentra en un equilibrio alterable , ya que un cierto número de moléculas están emigrando a la sub-fase en un instante de tiempo y a la par un número igual de moléculas pasa por la capa; gracias a las isotermas de adsorción de los modelos estudiados se logró establecer la concentración de la monocapa superficial en el semirrígido estudiado.

En el Cuadro 6 se muestran los parámetros MRE, RMSE y R^2 de los modelos de adsorción para los 9 tratamientos realizados. Puede apreciarse que el modelo que más se ajusta a los datos obtenidos experimentalmente es el de Peleg, el cual indica un mecanismo de adsorción definido por dos etapas: la primera refleja que a valores de actividad de agua inferiores a 0.7, las muestras adsorben bajas cantidades de vapor de agua, y la segunda muestra un incremento sustancial en los valores de CHE por encima de 0,7 de actividad de agua; se observara un incremento en la libre condensación (Álvarez *et al.*, 2010), y un aumento en la adsorción del material , la cual está ligada a la estructura, composición, procesos de calentamiento y secado, entre otros, los cuales comúnmente se relaciona con las características hidrofílicas de los materiales presentes en la matriz lo cual ocasiona las interacciones de los grupos hidrofílicos de los componentes y aumentan los puntos activos de adsorción.

La baja resistencia a la humedad, de este tipo de productos por cuanto son materiales altamente higroscópicos, complica sus funciones industriales, debido a que esta adsorción puede ocasionar la pérdida de las propiedades mecánicas al igual que una inestabilidad en el almacenamiento de los mismos (Navia *et al.*, 2011). En la figura 17 se aprecia el ajuste del contenido de humedad relativa (CHE) experimental con el propuesto por peleg, el modelo más preciso, esto concuerda con estudios anteriores en bioplásticos obtenidos a base de harina de yuca (CM 7951-5) y fibra de fique moldeados por termo compresión, donde se reportó que el modelo más acertado fue el modelo peleg para bioplásticos a las

temperaturas de 15, 25 y 35°C (Navia *et al.*, 2011), al igual que en bioplásticos a base de harina de yuca MPER-183 (Navia *et al.*, 2013) y “films” a partir de gelatinas provenientes de diferentes orígenes donde se ajustó satisfactoriamente este modelo (Alvaréz *et al.*, 2010).

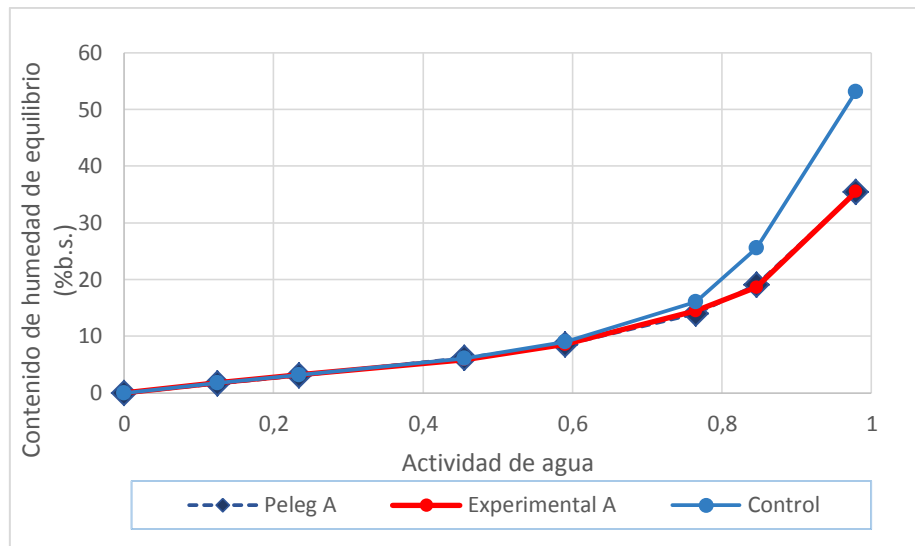


Figura 17. Isotermas de adsorción experimentales y predichas con el modelo PELEG, de los bioplásticos: Ta y muestra control
Fuente: Autor

Los modelos de Oswin, Cauire, Smith y Henderson fueron inválidos para realizar el modelado de las isotermas ya que sus valores de MRE, superaban en muchos tratamientos el 10%, aunque GAB fue inválido, este revela un valor muy importante para la aplicación industrial de los materiales, que se puede observar en el Cuadro 6 definido por las letras “ M_0 ”, el cual corresponde al valor de la monocapa que indica la disponibilidad de sitios activos para la adsorción de agua en el material, es decir que es la fuerza de enlace del agua en la superficie del material, estos valores aumentan a medida que la presión aumenta favoreciendo la fuerza de estos enlaces, gracias a los cambios estructurales que sufre el material en el procesamiento (Navia *et al.*, 2012); en otros estudios de bioplásticos a partir de harina de yuca en dos variedades y moldeada a 200°C se encontraron valores de “ M_0 ” que van desde 5 -8 (Villada *et al.*, 2011), y “films” a partir de almidón de yuca y dos plastificantes, donde se encontraron valores de

“M₀” que van desde 0.111 – 0.046 (Müller *et al.*, 2008), este último refleja que el moldeo por compresión causa un efecto positivo en el material, lo cual realza la estabilidad del material en condiciones normales.

Cuadro 6. Constantes isotermas

MODELO	CONS T	Tratamiento								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
GAB	Mo	1	1	2	1	0.967	1	0.9	1	1
	C	1	1	1	1	0.9	1	0.9	1	1
	K	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	MRE	7.3014	8.363	6.436	10.658	15.01	19.6	12.37	12.7	10.59
	RMSE	0.3517	0.394	0.7248	10.913	1.12	1.05	1.429	0.953	0.514
	R ²	0.999	0.998	0.9945	0.9933	0.987	0.99	0.976	0.994	0.999
OSWIN	B	0.2	0.49	0.49	0.2	0.2	0.5	0.49	0.49	0.49
	A	8.22	8	8	8.22	8.22	8.23	8.22	8.22	8.22
	MRE	29.053	29.608	10.043	24.071	23.61	26.7	18.74	26.98	28.09
	RMSE	1.6558	1.924	1.1588	11.045	2.089	2.05	1.69	2.022	1.962
	R ²	0.9765	0.969	0.9859	0.957	0.953	0.97	0.967	0.972	0.983
SMITH	A	1.43	1.43	1.43	1.43	1.5	1.43	1.6	1.6	1.43
	B	0.33	0.33	0.5	0.5	0.6	0.33	0.6	0.6	0.33
	MRE	2.8585	3.784	10.871	10.74	12.65	16.1	11.6	7.916	16.52
	RMSE	0.4433	0.748	1.3436	10.922	1.418	1.21	1.22	0.959	0.97
	R ²	0.9981	0.994	0.979	0.9801	0.974	0.99	0.975	0.993	0.995
HENDERSO N	A	0.099	0.099	0.109	0.116	0.111	0.11	0.113	0.1	0.099
	B	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	MRE	6.3348	7.601	16.726	18.398	17.76	17.6	21.92	12.19	13.27
	RMSE	0.3116	1.445	0.5520	10.965	2.066	1.41	2.273	1.168	3.455
	R ²	0.9866	0.98265	1.618	0.9658	0.954	0.98	0.94	0.991	0.946
PELEG	K1	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13
	N1	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
	K2	35.71	35.71	35.71	35.71	35.71	35.7	35.71	35.71	35.71
	N2	2.84	2.84	2.84	2.84	2.84	2.84	2.84	2.84	2.84
	MRE	2.9277	3.127	3.6797	5.8029	5.24	7.01	8.248	5.586	3.975
	RMSE	0.2652	0.228	0.5520	10.889	0.738	0.73	0.632	0.946	0.344
	R ²	0.9994	0.999	0.9968	0.9987	0.994	1	0.995	0.994	0.999
CAURIE	A	-1.17	-1.17	-2	-2	-2	-2	-1.3	-1.3	-1.3
	B	3.31	3.31	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
	MRE	14.251	12.167	20.561	9.2834	11.18	22	14.01	15.78	23.36
	RMSE	1.0748	0.8365	2.1902	10.899	0.976	1.21	1.4	1.371	1.482
	R ²	0.9894	0.9934	0.9469	0.9932	0.988	0.99	0.974	0.986	0.99

Fuente: Autor

Con respecto a los valores del parámetro K en el modelo GAB, se puede afirmar que la adsorción del material sólo la constituye una capa superficial, esto demuestra que las moléculas de agua que se encuentran después de la monocapa tienen un comportamiento parecido a las de la fracción líquida, por ende las multicapas existentes puede que sean inestables.

Con respecto a los valores de C o constante de Guggenheim, se puede apreciar que no fueron mayores a uno (1), lo cual indica que no hay diferencias entre el comportamiento de las moléculas de la monocapa y la multicapa. Entre más alto sea este valor, se presume un mayor número de enlaces de agua en la monocapa. Este parámetro también permite clasificar las isothermas (tipo I, II, III, IV o V) (Bart, 2005) (Ruthven, 2001), en este estudio los valores de C fueron menores a 2, indicando que las isothermas son tipo III, lo que indica a que no hay un punto de inflexión en la curva como se muestra en la figura 17.

En el cuadro 7 observamos los valores promedio obtenidos en el estudio, al realizar el análisis de los datos obtenidos en el programa SPSS 2.0 (2011) puede identificarse que la presión, la temperatura, interacción temperatura-actividad de agua, no tuvieron diferencias significativas ($p > 0.05$), sin embargo, la actividad de agua, la interacción presión-temperatura e interacción entre las tres tienen efecto sobre las propiedades de adsorción de los materiales ($p < 0.05$) (Anexo D).

Cuadro 7. Resultados experimentales de la adsorción de vapor de agua (g agua/100 g materia seca)

Tratamiento	Adsorción de vapor de agua (g agua/100g materia seca)						
	0.125	0.234	0.455	0.59	0.765	0.846	0.979
A	1.7537	3.1710	5.8622	8.5430	14.4827	18.6207	35.5172
B	1.983	3.105	5.692	8.637	14.767	19.404	35.082
C	5.410	6.692	7.112	8.612	15.092	18.022	33.680
D	3.402	3.000	5.866	8.483	14.540	19.004	30.000
E	3.813	3.322	5.378	8.465	16.170	18.218	30.975
F	2.224	3.244	5.483	5.611	14.761	18.674	36.220
G	5.483	3.646	6.795	8.429	14.674	18.520	30.789
H	2.341	3.499	6.153	8.225	17.311	19.558	38.786
I	1.965	3.228	5.553	8.612	16.104	22.343	47.983
Control*	1.7033	3.1869	6.0349	8.9693	16.0276	25.5884	53.1447

* Elaborado con harina nativa de yuca bajos las condiciones de proceso del tratamiento a.

Fuente: Autor

Los datos obtenidos demostraron que los bioplásticos presentaron una capacidad de retención de agua para actividades de agua mayores a 0.5, la cual se puede observar en la figura 17, donde se refleja una disminución en la adsorción en la muestra gelatinizada y la control. Esto se puede explicar por la gelatinización previa que causa una movilidad en las moléculas, generando un volumen libre en la estructura e incrementando los sitios activos, este proceso también disminuye las regiones cristalinas y aumenta las regiones amorfas que pueden llegar a solubilizarse a medida que aumenta la actividad de agua, contribuyendo a la formación de sitios activos; y aumentando la higroscopicidad, todo esto indica que la gelatinización previa de la harina de yuca genera un cambio positivo en la resistencia a la adsorción y ocasiona una mayor estabilidad del material y la utilización de este en el embalaje alimenticio.

5. Conclusiones

- La gelatinización previa de la harina de yuca favorece el aumento de las propiedades mecánicas y la disminución de la adsorción de vapor de agua.
- La acción de las bajas presiones y temperaturas favorece la formación de poros y la expansión del material disminuyendo la densidad.
- Los parámetros colorimétricos del material obtenido indicaron que el aumento de la temperatura y la presión aumenta significativamente la tendencia al oscurecimiento y disminuye drásticamente la luminosidad de las mismas
- El modelo de Peleg fue el que mejor se ajustó a los valores experimentales de contenido de humedad de equilibrio, con valores de MRE < a 10% y de $R^2 > 0.99$
- La temperatura y presión en el moldeo afectaron significativamente las propiedades mecánicas y fisicoquímicas de los materiales realizados a base de harina de yuca y fique, ya que estas pueden ocasionar una disminución de las propiedades
- Teniendo en cuenta resultados comunes de las variables de respuesta evaluadas, se concluye que el mejor tratamiento fue el obtenido a 180°C y 0 psi

6. Recomendaciones

Al realizar el trabajo experimental en el laboratorio se debieron tomar unas consideraciones que serían prácticas al momento de realizar otras investigaciones en este campo:

- Podría evaluarse el uso de un equipo que controle temperatura, tiempo y agitación en el proceso de gelatinización de la harina a nivel piloto, ya que estos dos factores pueden influir en la plastificación del material y también en las propiedades fisicoquímicas.
- Se pueden realizar pruebas para evaluar los cambios en la microestructura como lo son: SEM (microscopía electrónica de barrido), microscopía de alta definición, así como también pruebas que permitan validar la gelatinización como fotometría de espectro infrarrojo.
- Se pueden realizar pruebas mecánicas como la de impacto en el material para evaluar el comportamiento de la temperatura y presión en el material, al aplicar energía a altas velocidades de deformación.

7. Bibliografía

ALDABE, S., ARAMENDÍA, P., & LACREU, L. Química I. Fundamentos. Buenos Aires: Coliheu S.R.L, 1999.488 p. ISBN: 950-581-343-0

ALVARÉZ-AGUIRRE, G., SANDOVAL-VERGARA, A., PIMENTEL-GONZÁLES, D., CAMPOS-MONTIEL, R., & HIL, S.E. Modelado De Isotermas De Adsorción/Desorción De Gelatina En Polvo Proveniente De Diferentes Orígenes .En: Congreso nacional de ciencia y tecnología de alimentos (12:27-28, Mayo: Guanajuato, México) Memorias. Guanajuato, Gto: UANL, Universidad de Guanajuato, 2010.p 661-6615.

ÁLVAREZ C, Mario. La Industria De Los Surfactantes: Tendencias Mundiales Y Perspectivas Para Colombia. En: Palmas.2004, vol. 25 N° Especial, Tomo I. p.340-353.

American Standard and Testing Materials (ASTM). 2010. Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing (ASTM D 618).

American Standard and Testing Materials (ASTM). 2010. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (ASTM D 638).

American Standard and Testing Materials (ASTM). 2010. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials (ASTM D 790).

AMIGÓ, V., Salvador, M. D., & Sahuquillo, O. Aprovechamiento De Residuos De Fibras Naturales Como Elementos De Refuerzo De Materiales Poliméricos. En: Congreso internacional de fibras naturales con énfasis en materiales de construcción (5:17-18, Noviembre, Ibarra, Ecuador).Memorias. Ibarra .: Red"Valores",Centro de fibras naturales de la PUCE-SI,2008.12 p

ANGULO F, Alberto M., LOZANO, Angie T., HERNÁN J, Fabián., Manejo de residuos sólidos municipales. [En línea]. Bogotá. 2012. Recuperado 28, mayo,

2014. Obtenido de Sistema de bibliotecas Sena: http://biblioteca.sena.edu.co/exlibris/aleph/u21_1/alephe/www_f_spa/icon/17651/manejos_residuos/manejo_residuos.html#

ARISTIZABAL, J., & SANCHEZ, T. Guía Técnica Para Producción Y Análisis De Almidon De Yuca. Roma: Fao, 2007,153p.(Boletín de servicios agrícolas de la FAO;N°163).ISBN 978-92-5-305677-4

AVEDAÑO C, Grace L. Diseño y evaluación de las propiedades mecánicas y de barrera de un biopolímero obtenido a partir de almidón de papa para ser empleado en empaques para alimentos. Trabajo de grado Ingeniera de alimentos, Duitama: Universidad nacional abierta y a distancia. Escuela de ciencias básicas e ingeniería, 2009. 174p.

BART, H. (2005). Adsorption. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. DOI: 10.1002/14356007. b03_09.pub2

BELTRAN R, M., & MARCILLA G, A. Tecnología De Polímeros: Procesado Y Propiedades. España: Universidad De Alicante.2012.54p

BENITEZ, T. (2008). Caracterización morfológica y térmica del almidón de maíz (*Zea mays l*), obtenido por diferentes métodos de aislamiento. Trabajo de grado licenciado en química en alimentos, Pachuca de Soto, Hidalgo: Universidad autónoma del estado de Hidalgo.2008.68p

BLANCO-ALVAREZ, F. Plásticos.Universidad De Oviedo [En línea]. Actualizada 2011. [Fecha de consulta: 30 de abril 2014].Disponible en:<http://Www6.uniovi.Es/usr/Fblanco/Leccion8.Plásticos.Materiasprimas.Pdf>

BUENO F, C. Bio-compuestos termoplásticos basados en aceites vegetales. Estudio de su aplicabilidad al envasado de alimentos. Tesis doctoral, Doctor en química. Modalidad de doctorado internacional. Alicante: Universidad de Alicante. Facultad de ciencias. Departamento de química analítica, nutrición y bromatología.2012.275p.Obtenido de repositorio institucional de la universidad

de alicante:
http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/26479/1/Tesis_Bueno%20Ferrer.pdf

BURGOS B, N. Desarrollo de bionanocompuestos en base a poli (ácido láctico) y plastificantes de alta compatibilidad para el envasado de alimentos. Tesis doctoral, Doctor en química. Alicante: Universidad de Alicante. Facultad de ciencias. Departamento de química analítica, nutrición y bromatología.2013.301p.Obtenido de repositorio institucional de la universidad de alicante:

http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/31986/1/tesis_nuriaburgosbolufer.pdf

CAMACHO, I. R. Estudio de factibilidad parte II: Paquete tecnológico agrícola. Proyecto ingenio Yuquero Cali: Fundación Mitsubimi, CIAT, Clayuca, 2000.159p

CAURIE, M. A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehydrated foods. En: Journal of Food Technology.1970, vol 5. p 301-307.

CIANNAMEA, E. M., STEFANI, P. M., & RUSECKAITE, R. A. (2014). Physical And Mechanical Properties Of Compression Molded And Solution Casting Soybean Protein Concentrate Based Films. En: Food Hydrocolloids.2014, vol.38.p 193-204.

CORPORACIÓN COLOMBIANA INTERNACIONAL. Boletín CCI: Sim: Perfil de producto No.6 [En línea]. Diciembre 1999.[Fecha de consulta: 05 Septiembre, 2014, Disponible en: Corporación Colombiana Internacional: Http://Www.Cci.Org.Co/Cci/Cci_X/Sim/Perfil%20de%20productos/Perfilyuca6.Htm

CUI, M., FANG, L., ZHOU, H., & YANG, H. Effects of amino acids on the physiochemical properties of potato starch. En: Food chemistry. 2014, vol.151. p 162-167.

DEBIAGI, F., Mali, S., GROSSMANN, M. V. E., & YAMASHITA, F.

Biodegradable foams based on starch, polyvinyl alcohol, chitosan and sugarcane fibers obtained by extrusion. En: Brazilian Archives of Biology and Technology.2011, vol.54, No 5. p 1043-1052.

DEGARMO, P. E., BLACK, T. J., & KOHSER, R. A. Materiales y procesos de fabricación.2002. España: Reverté.2002.521p.ISBN:84-291-4822-1

ESCANDÓN, J. M. Biblioteca servicio nacional de aprendizaje.[En línea].7 Enero De 2013.[Fecha de consulta30 abril 2014] . Disponible en: sena web site : http://biblioteca.sena.edu.co/exlibris/aleph/u21_1/alephe/www_f_spa/icon/45896/informador69/difusion/difusion.html

FAMÁ, Lucía, GERSCHENSON Lía, and GOYANES Silvia. Starch-vegetable fibre composites to protect food products.En: Carbohydrate polymers. 2009, vol. 75, No. 2. p230-235.

FAO. Colombia Lanza El "Plan Nacional De Yuca Industrial". En: Agronoticias América Latina Y El Caribe.Colombia.18,Febrero,2013, disponible en: <http://www.fao.org/agronoticias/agro-noticias/detalle/es/c/170274/>

FUENMAYOR C, F. C., MONTILLA, J., ALBARRÁN, J. G., PÉREZ, M., VACCARINO A, L. C., & SEGOVIA S, V. F. Evaluación y selección de clones de yuca (Manihot esculenta Crantz) del Plan Nacional de Semilla del INIA-Venezuela. Resultados preliminares. En: Revista Científica UDO Agrícola. 2012, vol. 12, No 1. p 17-24.

GONZÁLES, J., PARTAL, P., GARCÍA, M., & GALLEGOS, C. Effect of processing on the viscoelastics, tensile and optical properties of albumen/starcha-based bioplastics. En: Carbohydrate Polymers. 2011, vol. 84, Issue1. p 308-315.

GRAY S, C. A., CÁRDENAS M, A. R., ESPINOZA G, M., & FERNANDEZ G, P. Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post- consumo: Guías

Ambientales.2004. Bogota: Xpreess Studio Grafico.140p

HENDERSON, S.M. (1952). A basic concept of equilibrium moisture.En: Agricultural Engineering 1952, vol. 33. p 29-32.

IBRAHIMA, H., FARAG, M., MEDAHED, H., & MEHANNY, S.Characteristics of starch-based biodegradable composites reinforced with date palm and flax fibers. En:Carbohydrate Polymers.2014, vol. 101. p 11-19.

IBM Software. SPSS Statistics Software. Version 20.0. 2011. <http://www-01.ibm.com/software/analytics/spss/products/statistics/index.html>.

KAEWATIP, K., & THONGMEE, J. (2013). The effects of cross-linked starch on the properties of thermoplastic starch. En: Materials & Design. 2013, vol. 45. p 586-589.

KHOSHGOZARAN-ABRAS, S., HOSSEIN A., M., HAMIDY, Z., & BAGHERIPOOR-FALLAH, N. Mechanical, physicochemical and color properties of chitosan based-films as a function of aloe vera gel incorporation. En:Carbohydrate Polymers. 2012, vol.87, No. 3. p 2058-2062.

KRISTENSEN, S. B. P., BIRCH-Thomsen, T., RASMUSSEN, K., RASMUSSEN, L. V., & Traoré, O. (2014). Cassava as an energy crop: A case study of the potential for an expansion of cassava cultivation for bioethanol production in Southern Mali .En: Renewable Energy. 2014, vol. 66. p 381-390.

LEBLANC, N., SAIAH, R., BEUCHER, E., GATTIN, R., CASTANDET, M., & SAITER, J. M. (2008). Structural investigation and thermal stability of new extruded wheat flour based polymeric materials. En: Carbohydrate polymers. 2008, vol.73, No.4. p 548-557.

LOPATTANANON, N., SONGKAEW, S., THONGRUANG, W., & SEADAN, M. Sustainable biocomposites from rice flour and sisal fiber: Effect of fiber loading, length and alkali treatment. En: International polymer processing. 2009,Vol. 24, No. 3.pp. 272-279.

LOPATTANANON, N; THONGPIN C, and SOMBATSOMPOP, N. Bioplastics from Blends of Cassava and Rice Flours: The Effect of Blend Composition. En: International Polymer Processing. 2012, Vol. 27, No. 3. pp. 334-340.

MANRIQUE, E. Tensoactivos y auxiliares. Artisam [En línea]. [Fecha de consulta: 30 Abril 2014]. Disponible en: <http://www.artisam.org/descargas/pdf/TENSOACTIVOS%20PARTE2.pdf>

MENESES, J., Corrales, C. M., & Valencia, M. Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir de almidón de yuca. En: Revista Eia. 2007, No 8. p 57-67.

MERCOSUR. (11 De Diciembre De 2007). Reglamento técnico mercosur sobre " lista positiva de aditivos para materiales plásticos destinados a la elaboración de envases y equipamientos en contacto con los alimentos". Resolución N° 32 DEL 2007. MONTEVIDEO.

MONTALDO, A. (1991). Cultivo de raíces y tubérculos tropicales (No. 21). Agroamerica.

MONTALDO, A., & GUNZ, T. (1985). La yuca o mandioca: cultivo, industrialización, aspectos económicos, empleo en la alimentación animal, mejoramiento (Vol. 38). IICA.

MUÑOZ M, D., & CABRERA C, G. El fique como aislante térmico. En: Biotecnología. 2007, Vol. 5, p 10-16.

MORALES Q, L. A. (2007). Estudio del proceso de transferencia de calor convectivo en nano fluidos. Tesis doctoral en ingeniero mecánico, Barranquilla: Universidad Del Norte.

MÜLLER, C. M., YAMASHITA, F., & LAURINDO, J. B. Evaluation of the effects of glycerol and sorbitol concentration and water activity on the water barrier properties of cassava starch films through a solubility approach. En: Carbohydrate Polymers, 2008, vol. 72, No.1, p 82-87.

NAVIA P, D.P; VILLADA, H.S; CASTAÑEDA N, J.P. (2011). *Patente de invención "Proceso de obtención de un material compuesto por harina de yuca, fibra de fique y glicerina"*. No. 78975. Colombia: Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia

NAVIA P, D. P., & VILLADA, H. S. (2013). Evaluación mecánica de bioplásticos semirrígidos elaborados con harina de yuca. En: *Biotecnología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial*.2013, vol. 9, No.1, p 77-84.

NAVIA, D. P., AYALA, A. A., & VILLADA, H. S. (2012). Modelación matemática de las isotermas de adsorción en materiales bioplásticos de harina de yuca. En: *Vitae*.2012, vol.19, No.1, p S423-S425.

NAVIA P, D. P., AYALA A, A. A., & VILLADA C, H. S. (2013). Determinación de isotermas de adsorción de agua en biocompuestos de harina termoplástica y fique. En:*Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 2013, vol. 11,No.1, p 144-153.

ORTEGA Cartaya, E., & VELÁSQUEZ, E. J. Obtención y manejo de estacas de calidad para la producción integral de yuca. *Fonaiap Divulga (Venezuela)*.(Abr-Jun 1996, vol.53, 20-23.

OLIVATO, Juliana Bonametti, MÜLLER, Carmen Maria Oliveira, YAMASHITA, Study of the compatibilizer effect in the properties of starch/polyester blends. En: *Polímeros*. 2013, vol. 23, No.3, p 346-351.

ORTEGA-Toro, R., JIMÉNEZ, A., TALENS, P., & CHIRALT, A. (2014). Properties of starch–hydroxypropyl methylcellulose based films obtained by compression molding. En: *Carbohydrate polymers*. 2014, vol.109, p 155-165.

OSWIN, C. R. The kinetics of package life III. The Isotherm. En: *Journal of the Society of Chemical Industry*. 1946, vol.65, p 419-421

PRAKASH M, J., SIVAKUMAR, V., SRIDHAR, R., & PRINCE I, V. (2013). Development of model for mechanical properties of tapioca starch based edible

films. En: Industrial crops and products. 2013, vol. 42, p 159-168.

PELEG, M. (1993). Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherm. En Journal of Food Process Engineering. 1993, vol.16, p 21-37

PELISSARI, F. M., ANDRADE-Mahecha, M. M., SOBRAL, P. J. D. A., & Menegalli, F. C. (2013). Comparative study on the properties of flour and starch films of plantain bananas (Musa paradisiaca).En: Food Hydrocolloids, 2013, vol.30, No.2, p 681-690.

RODRIGEZ, R., ALBERTO, P., MARÍA, P., & DELIA, G. (2012). Conformado de un material denso-poroso a base de albúmina: desarrollo del proceso. En: Universidad de ciencia y tecnología, p 47-53.

RODRIGUEZ M., J., CASTRO M., L., & DEL REAL R., J. C. (2006). Procesos industriales para materiales no metalicos. España: Editorial Vision Net.

RUTHVEN, D. (2001). Adsorption. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. DOI: 10.1002/0471238961.01041915182120

RUEDA, S. M., & APARICIO, J. (2011). Factibilidad Para La Creación De Una Empresa Productora De Bolsas Para Empaque A Base De Fique De Aratoca Santander Para El Mercado Comercial De Roa Y Calzado De Bucaramanga. Recuperado El 2013, De Repositorio Institucional Universidad Regional De Santander:

[Http://Repositorio.Uis.Edu.Co/Jspui/Bitstream/123456789/11648/2/142263.Pdf](http://Repositorio.Uis.Edu.Co/Jspui/Bitstream/123456789/11648/2/142263.Pdf)

SEYMOUR, R. B., & CARRAHER Jr, C. E. (2002). Introduccion a la química de los polímeros. España: Reverté S.A.

SEYMOUR, R. B., & CARRAHER, C. E. (1995). Introducción a la química de los polímeros. Barcelona: Editorial Reverté.

SHACHAM. M., CUTLIP. M., Elly. M., Polymath Software. Version 6.0. 2011.

<http://www.polymath-software.com/>.

SMITH, S.E. (1947). The sorption of water vapour by high polymers. En: Journal of the American Chemical Society. 1947, vol.69, p 646.

SOTHORNVITA, R., OLSENB, C., MCHUGHB, T., & KROCHTAC, J. K. Tensile properties of compression-molded whey protein sheets: Determination of molding condition and glycerol-content effects and comparison with solution-cast films. En: Journal of Food Engineering. 2007, vol. 78, No. 3, p 855-860.

SUN, S., SONG, Y., & ZHENG, Q. (2008). Morphology and mechanical properties of thermo-molded bioplastics based on glycerol-plasticized wheat gliadins. En: Journal of cereal science. 2008, vol. 48, No. 3, p 613-618.

THARANATHAN, R. (2003). Biodegradable Films And Composite Coatings: Past, Present And Future. En: Food Science & Technology. 2003, vol. 71, No. 3 ,p 71-78.

T, O., Rodrigo, T, P., j, A., & CHIRALT, A. (2012). Efecto de la incorporación de tensoactivos en las propiedades físicas de films a base de almidón de maíz. Valencia. Obtenido de Universidad politécnica de Valencia.

Universidad Nacional De Colombia [En línea]. 2000.[Recuperado 25 abril 2014].. Obtenido De Unal Web Site: <Http://Www.Virtual.Unal.Edu.Co/Cursos/Sedes/Palmira/5000155/Index.Html>

VACLAVICK, V. A. 2002. Fundamentos de ciencia de los alimentos. Editorial Acribia, S.A.Zaragoza,España.

VAN DEN BERG, C. (1985). Development of B.E.T.like models for sorption of water on foods, theory and relevance. In D. Simatos & J. L. Multon (Eds.), Properties of water in foods, 119. Dordrecht: Mar- tinus Nijhoff.

VALERO-Valdivieso, M. F., ORTEGÓN, Y., & USCATEGUI, Y. Biopolímeros: avances y perspectivas. En: Dyna. 2013, vol. 80 No.181, p171-180.

VELASCO, S. M., MOSQUERA, C. F. D., & MOSQUERA, D. L. D. Usos de los Subproductos Provenientes de la Agroindustria del Fique (*Furcraea cabuya*) en el Municipio de Totoró-Cauca-Colombia. En: Cuadernos de Agroecología. 2009, vol. 4, No.1.

VILLADA, H. S., ACOSTA, H. A., & VELASCO, R. J. (2007). Biopolímeros naturales usados en empaques biodegradables. En: Temas Agrarios, vol.12, No.2.

VILLADA, H. S., ACOSTA, H. A., & VELASCO, R. J. (2008). Investigación de Almidones Termoplásticos, Precursores de Productos Biodegradables. En: Información tecnológica. 2008, vol.19, No.2, p 3-14.

WHITTEN, K. W., RAYMOND E, D., Peck, L. M., & Stanley, G. G. (2008). Química 8a.Edición. México: Cengage Learning Editores, S.A.

WITTCOFF, H. A., & REUBEN, B. G. (2002). Productos Químicos Orgánicos Industriales. Tecnología, Formulaciones Y Usos V.2. México: Limusa S.A.

8. ANEXOS

Anexo A. Anova y Post-anova Pruebas mecánicas

Tests of Between-Subjects Effects						
Source	Dependent Variable	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	M.Tensión	55171.758 ^a	8	6896.47	93900496.1	0
	ModuloFle	30183.321 ^b	8	3772.915	264401758	0
	E.Tensión	1.050 ^c	8	0.131	82437.25	0
	E.Flexión	1.974 ^d	8	0.247	66606.03	0
Intercept	M.Tensión	5396560.51	1	5396560.51	7.3478E+10	0
	ModuloFle	1728893.07	1	1728893.07	1.2116E+11	0
	E.Tensión	73.362	1	73.362	46064745	0
	E.Flexión	555.424	1	555.424	149964516	0
Temperatura	M.Tensión	17252.417	2	8626.208	117452156	0
	ModuloFle	7807.132	2	3903.566	273557619	0
	E.Tensión	0.417	2	0.208	130812.372	0
	E.Flexión	0.061	2	0.031	8280.84	0
Presión	M.Tensión	31770.045	2	15885.022	216286235	0
	ModuloFle	18912.817	2	9456.408	662694733	0
	E.Tensión	0.532	2	0.266	167051.256	0
	E.Flexión	1.469	2	0.734	198314.67	0
Temperatura * presión	M.Tensión	6149.297	4	1537.324	20931796.4	0
	ModuloFle	3463.373	4	865.843	60677340.4	0
	E.Tensión	0.102	4	0.025	15942.686	0
	E.Flexión	0.443	4	0.111	29914.305	0
Error	M.Tensión	0.001	18	7.34E-05		
	ModuloFle	0	18	1.43E-05		
	E.Tensión	2.87E-05	18	1.59E-06		
	E.Flexión	6.67E-05	18	3.70E-06		
Total	M.Tensión	5451732.27	27			
	ModuloFle	1759076.39	27			
	E.Tensión	74.413	27			
	E.Flexión	557.398	27			
Corrected Total	M.Tensión	55171.759	26			
	ModuloFle	30183.322	26			
	E.Tensión	1.05	26			
	E.Flexión	1.974	26			
a. R Squared = 1.000 (Adjusted R Squared = 1.000)						
b. R Squared = 1.000 (Adjusted R Squared = 1.000)						
c. R Squared = 1.000 (Adjusted R Squared = 1.000)						
d. R Squared = 1.000 (Adjusted R Squared = 1.000)						

Modulo Tensión

Tukey HSD

Temperatura	N	Subset		
		1	2	3
200.00	9	421.7664		
180.00	9		437.8552	
190.00	9			481.5918
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 7.34E-005.

- Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.
- The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
- Alpha = .05.

Módulo Flexión

Tukey HSD

Temperatura	N	Subset		
		1	2	3
200.00	9	240.2734		
190.00	9		241.7897	
180.00	9			277.0796
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.43E-005.

- Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.
- The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
- Alpha = .05.

Esfuerzo Tensión

Tukey HSD

Temperatura	N	Subset		
		1	2	3
200.00	9	1.4749		
180.00	9		1.7111	
190.00	9			1.7591
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.59E-006.

- Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.
- The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
- Alpha = .05.

Esfuerzo Flexión

Tukey HSD

Temperatura	N	Subset		
		1	2	3

190.00	9	4.4749		
200.00	9		4.5404	
180.00	9			4.5913
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 3.70E-006.

- Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.
- The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
- Alpha = .05.

Modulo Tensión

Tukey HSD

presion	N	Subset		
		1	2	3
40.00	9	399.6693		
.00	9		461.8388	
20.00	9			479.7053
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 7.34E-005.

- Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.
- The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
- Alpha = .05.

Modulo Flexión

Tukey HSD

presion	N	Subset		
		1	2	3
40.00	9	215.7537		
.00	9		268.9404	
20.00	9			274.4487
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.43E-005.

- Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.
- The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
- Alpha = .05.

Esfuerzo Tensión

Tukey HSD

presion	N	Subset		
		1	2	3

40.00	9	1.4607		
.00	9		1.6862	
20.00	9			1.7982
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.59E-006.

- Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.
- The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
- Alpha = .05.

Esfuerzo Flexión

Tukey HSD

presion	N	Subset		
		1	2	3
40.00	9	4.2058		
.00	9		4.6937	
20.00	9			4.7072
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 3.70E-006.

- Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.
- The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
- Alpha = .05.

Anexo B. Anova y Post-anova Densidad

Source	Dependent Variable	Type III Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	Densidad	.003 ^a	8	0	3806.333	0
Intercept	Densidad	5.247	1	5.247	47227136.3	0
Temperatura	Densidad	0.001	2	0.001	5777.333	0
Presión	Densidad	0.002	2	0.001	7734.333	0
Temperatura * presión	Densidad	0	4	9.52E-05	856.833	0
Error	Densidad	2.00E-06	18	1.11E-07		
Total	Densidad	5.251	27			
Corrected Total	Densidad	0.003	26			

a. R Squared = .999 (Adjusted R Squared = .999)

Densidad

Tukey HSD

Temperatura	N	Subset		
		1	2	3
180.00	9	.4312		
190.00	9		.4443	
200.00	9			.4470
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.11E-007.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = .05.

Densidad

Tukey HSD

presion	N	Subset		
		1	2	3
.00	9	.4302		
20.00	9		.4429	
40.00	9			.4494
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.11E-007.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = .05.

Anexo C. Anova y Post-anova Color

Source	Dependent Variable	Type III Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	L	34.470 ^a	8	4.309	29.127	0
	a	.289 ^b	8	0.036	4376.02	0
	b	5.981 ^c	8	0.748	128562.718	0
Intercept	L	119781.966	1	119781.966	809720.583	0
	a	1595.112	1	1595.112	193164858	0
	b	19530.1	1	19530.1	3358679634	0
Temperatura	L	13.203	2	6.602	44.626	0
	a	0.034	2	0.017	2072.054	0
	b	5.215	2	2.608	448461.79	0
Presión	L	10.316	2	5.158	34.868	0
	a	0.156	2	0.078	9458.588	0.06
	b	0.605	2	0.302	52012.401	0.09
Temperatura*Presión	L	10.951	4	2.738	18.507	0
	a	0.099	4	0.025	2986.719	0.09
	b	0.16	4	0.04	6888.341	0.13
Error	L	2.663	18	0.148		
	a	0	18	8.26E-06		
	b	0	18	5.82E-06		
Total	L	119819.098	27			
	a	1595.402	27			
	b	19536.081	27			
Corrected Total	L	37.132	26			
	a	0.289	26			
	b	5.981	26			

a. R Squared = .928 (Adjusted R Squared = .896)
b. R Squared = .999 (Adjusted R Squared = .999)
c. R Squared = 1.000 (Adjusted R Squared = 1.000)

L

Tukey HSD

Temperatura	N	Subset		
		1	2	3
200.00	9	65.6881		
190.00	9		66.7464	
180.00	9			67.3837
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = .148.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = .05.

a*

Tukey HSD

Temperatura	N	Subset		
		1	2	3
180.00	9	7.6372		
190.00	9		7.7008	
200.00	9			7.7207
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 8.26E-006.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = .05.

b*

Tukey HSD

Temperatura	N	Subset		
		1	2	3
200.00	9	26.4131		
190.00	9		26.7958	
180.00	9			27.4759
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 5.81E-006.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = .05.

L

Tukey HSD

presion	N	Subset	
		1	2
40.00	9	65.9847	
20.00	9	66.3843	
.00	9		67.4492
Sig.		.097	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = .148.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used.

Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = .05.

a*

Tukey HSD

presion	N	Subset	
		1	2
.00	9	7.5787	
20.00	9		7.7399
40.00	9		7.7401
Sig.		1.000	.991

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 8.26E-006.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used.

Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = .05.

b*

Tukey HSD

presion	N	Subset		
		1	2	3
40.00	9	26.7220		
20.00	9		26.8757	
.00	9			27.0871
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 5.81E-006.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = .05.

Anexo D. Anova y Post-anova Isotermas

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	46504,123 ^a	62	750,066	129,112	,000
Intercept	42872,912	1	42872,912	7379,865	,000
Temperatura	59,980	2	29,990	5,162	,007
Presión	1,533	2	,766	,132	,877
AW	45270,408	6	7545,068	1298,759	,000
Temperatura * Presión	113,004	4	28,251	4,863	,001
Temperatura * AW	114,964	12	9,580	1,649	,086
Presión * AW	130,904	12	10,909	1,878	,043
Temperatura * Presión * AW	813,329	24	33,889	5,833	,000
Error	731,990	126	5,809		
Total	90109,025	189			
Corrected Total	47236,113	188			

a. R Squared = ,985 (Adjusted R Squared = ,977)

Temperatura

CHE

Tukey HSD

Temperatura	N	Subset	
		1	2
190,00	63	14,27950376	
200,00	63		15,31904432
180,00	63		15,58515743
Sig.		1,000	,810

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 5,809.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 63,000.

b. Alpha = 0.05.

Presión

CHE

Tukey HSD

Presión	N	Subset
		1

40,00	63	14,94151783
,00	63	15,08345489
20,00	63	15,15873279
Sig.		,869

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 5,809.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 63,000.

b. Alpha = 0.05.

AW

CHE

Tukey HSD

AW	N	Subset					
		1	2	3	4	5	6
,1250	27	2,85044444					
,2340	27	3,65636313					
,4550	27		5,95123704				
,5900	27			8,4959259			
,7650	27				14,9833259		
,8460	27					18,9904928	
,9790	27						50,50085692
Sig.		,882	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 5,809.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 27,000.

b. Alpha = 0.05.