
NORMA CUBANA

NC

974: 2013

PRESAS, DIQUES DE PROTECCIÓN, CANALES Y OBRAS ASOCIADAS — CATEGORÍAS PARA NUEVOS PROYECTOS O PARA EL REDISEÑO DE ESTRUCTURAS EXISTENTES EN UN ESCENARIO CLIMÁTICO CAMBIANTE

Dams, protection embankments, channels and related structures — Categories for new designs or for the redesign of existing structures in a changing climatic scenario

ICS: 93.160

1. Edición Diciembre 2013
REPRODUCCIÓN PROHIBIDA

Oficina Nacional de Normalización (NC) Calle E No. 261 El Vedado, La Habana. Cuba.
Teléfono: 830-0835 Fax: (537) 836-8048; Correo electrónico: nc@ncnorma.cu; Sitio
Web: www.nc.cubaindustria.cu



Cuban National Bureau of Standards

NC 974: 2013

Prefacio

La Oficina Nacional de Normalización (NC), es el Organismo Nacional de Normalización de la República de Cuba y representa al país ante las organizaciones internacionales y regionales de normalización.

La elaboración de las Normas Cubanas y otros documentos normativos relacionados se realiza generalmente a través de los Comités Técnicos de Normalización. Su aprobación es competencia de la Oficina Nacional de Normalización y se basa en las evidencias del consenso.

Esta Norma Cubana NC 974: 2013

- Ha sido elaborada por el Comité Técnico de Normalización NC/CTN 106 de Recursos Hidráulicos, integrado por representantes de las siguientes entidades:

Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos
Instituto de Planificación Física
Oficina Nacional de Normalización
Empresa de Investigaciones y Proyectos
Hidráulicos Habana

Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría
Ministerio de la Construcción
Aguas de La Habana

- Está basada en un proyecto elaborado la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana del Grupo Empresarial de Investigaciones, Proyectos e Ingeniería, con la colaboración de especialistas del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.
- Incluye el Anexo A (informativo).

© NC, 2013

Todos los derechos reservados. A menos que se especifique, ninguna parte de esta publicación podrá ser reproducida o utilizada en alguna forma o por medios electrónicos o mecánicos, incluyendo las fotocopias, fotografías y microfilmes, sin el permiso escrito previo de:

Oficina Nacional de Normalización (NC)

Calle E No. 261, El Vedado, La Habana, Habana 4, Cuba.

Impreso en Cuba.

Índice

0	Introducción	4
1	Objeto	5
2	Referencias normativas	5
3	Términos y definiciones	5
4	Lista de símbolos	7
5	Principios generales de clasificación de las obras hidráulicas	7
6	Determinación de las categorías de proyección de las obras hidráulicas, y en particular, de las presas y obras asociadas	9
7	Influencia de las clases de cimientos en las categorías de proyección de las obras hidráulicas	14
8	Obligaciones que imponen las categorías de proyección. Determinación de las probabilidades de superación de las crecidas extremas a evacuar por las estructuras de servicio de las presas y obras asociadas	16
9	Los impactos del cambio climático y el rediseño de las presas y obras asociadas	27
	Anexo A (informativo). Aspectos ilustrativos de un estudio de caso	34
	Bibliografía	42

0 Introducción

0.1 En comparación con las regulaciones de años anteriores, en esta norma se han introducido los siguientes cambios:

0.1.1 Se añade una lista de términos y definiciones.

0.1.2 Se añade una lista de símbolos.

0.1.3 El alcance ha sido ampliado.

0.1.4 Los principios generales de clasificación y la clasificación de las obras hidráulicas, han sido modificados y ampliados.

0.1.5 La determinación de la categoría de proyección de las obras hidráulicas, y en particular de las presas y obras asociadas, ha sido modificada y ampliada.

0.1.6 Se han incluido gráficos para la determinación de la categoría de proyección de las presas y los muros de contención situados en un frente de carga.

0.1.7 Se han incluido consideraciones sobre la influencia de las clases de cimientos, en las categorías de proyección de las obras hidráulicas.

0.1.8 Se ha incluido un análisis de las consecuencias de la categorización de proyección y una estimación del fenómeno de potencial rotura de las presas en Cuba, y se ha precisado y ampliado la determinación de las probabilidades de superación de las crecidas extremas a evacuar por las estructuras de servicio de las presas y obras asociadas.

0.1.9 Se ha incluido la Crecida Máxima Probable como una segunda situación de comprobación para la proyección de las presas y obras asociadas, y una guía para determinar en Cuba las Precipitaciones Máximas Probables capaces de originar dichas crecidas.

0.1.10 Se exponen ejemplos reales de aplicación de las indicaciones de la Norma y de indicaciones concomitantes.

0.1.11 Se han incluido consideraciones sobre los impactos del cambio climático y el rediseño o remodelación de las presas y obras asociadas, y los resultados de experiencias recientes alcanzadas con la actualización de más de veinte presas.

0.1.12 Se añade una lista de fuentes bibliográficas.

0.1.13 Se han realizado varias mejoras de redacción.

PRESAS, DIQUES DE PROTECCIÓN, CANALES Y OBRAS ASOCIADAS — CATEGORÍAS PARA NUEVOS PROYECTOS O PARA EL REDISEÑO DE ESTRUCTURAS EXISTENTES EN UN ESCENARIO CLIMÁTICO CAMBIANTE

1 Objeto

Esta Norma Cubana establece los procedimientos y especificaciones para categorizar, desde el punto de vista de su proyección, las presas y obras asociadas que se construyan en la República de Cuba, con excepción de las obras de acueducto, alcantarillado y las vinculadas a estas últimas, e incluye las indicaciones para establecer las crecidas extremas más desventajosas que se deben adoptar para proyectar los aliviaderos, determinar los niveles característicos del agua en los embalses, calcular las cotas de coronación y de corona de las cortinas de las presas, y adoptar las medidas necesarias para su protección contra el oleaje. La Norma se aplica por igual a la proyección de nuevas presas y obras asociadas, y a la revisión y el rediseño o remodelación de las ya existentes, en los casos necesarios.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos de referencia son indispensables para la aplicación de esta Norma Cubana. Para las referencias fechadas, sólo es aplicable la edición citada. Para las referencias no fechadas, se aplica la última edición del documento de referencia (incluyendo cualquier enmienda).

- NC 48-03 *Ingeniería hidráulica — Riego y drenaje — Términos y definiciones.*
- NC 59: 2000 *Geotecnia. Clasificación geotécnica de los suelos.*

3 Términos y definiciones

A los fines de este documento, se aplican los términos y las definiciones indicadas en la NC 48-03 y la NC 59: 2000, así como los siguientes:

3.1 Obra permanente: la que constituye una parte fundamental de un conjunto hidráulico, o de una combinación de obras que revista una mayor complejidad, y que resulte necesaria durante toda la vida útil de dicho conjunto hidráulico, o combinación de obras.

3.1.1 Obra permanente principal: la que al interrumpir su funcionamiento por reparaciones o a causa de averías, provoque el cese total o una disminución considerable y prolongada de las entregas de agua a los diferentes usuarios, el anegamiento de las áreas bajo drenaje o desecación, la paralización de las centrales hidroeléctricas, u otros perjuicios.

3.1.2 Obra permanente secundaria: la que con la interrupción de su funcionamiento, no provoque ninguna de las consecuencias señaladas en el caso de las obras permanentes principales.

3.2 Obra temporal: la que funcione únicamente durante los períodos de construcción o de reparación de una obra permanente, pero no resulte necesaria cuando la explotación de esta última transcurra en condiciones normales de funcionamiento.

3.3 Presa de derivación: la que se levante para elevar los niveles del agua, de modo que puedan ser captados y encauzados con objeto de su aprovechamiento.

3.4 Presa de almacenamiento: la que se construya para almacenar volúmenes de agua destinados a diferentes usuarios, y que presente alturas iguales o superiores a 15 m (o inferiores a éstas, si almacena en su embalse volúmenes mayores de 3 hm³).

3.4.1 Micropresa (de almacenamiento): la que se construya para almacenar volúmenes de agua destinados a diferentes usuarios, y que presente alturas menores de 15 m e iguales o superiores a 6 m, y almacene en su embalse volúmenes inferiores a 3 hm³ e iguales o mayores a 0,15 hm³.

3.4.2 Tranque (de almacenamiento): el que se construya para almacenar volúmenes de agua destinados a diferentes usuarios, y que presente alturas menores de 6 m y almacene volúmenes inferiores a 0,15 hm³.

3.5 Aliviadero: estructura de servicio de las presas, que se destina a evacuar los volúmenes en exceso que penetran en su embalse, o se acumulan en su tramo de aguas arriba.

3.5.1 Aliviadero principal: el que en general responda por sí solo, por lo menos, por la evacuación íntegra de las crecidas de diseño y de comprobación.

3.5.2 Aliviadero auxiliar: el que en determinados casos se construya para compartir con un aliviadero principal la evacuación de las crecidas de diseño, y sobre todo de comprobación, así como de otras que tengan menor probabilidad de ocurrencia.

3.5.3 Aliviadero de emergencia o de reserva: el que eventualmente se construya para contribuir a evacuar las crecidas de comprobación, así como aquéllas que con carácter extraordinario, puedan superar en magnitud a estas últimas.

3.6 Aliviadero fusible: el que se construya fundiendo una base de hormigón, y levantando sobre ella un dique que se destine a quedar destruido por el vertimiento del agua sobre el mismo, y constituya una estructura auxiliar o de emergencia, que complemente el funcionamiento de un aliviadero principal para la evacuación de las crecidas de comprobación, o de las crecidas de carácter extraordinario que superen a estas últimas.

3.7 Categoría de proyección: la que se asigne a una obra hidráulica al proceder a su proyección (y por extensión, a su remodelación), en dependencia de características fundamentales específicas tales, como su carga máxima de cálculo, los perjuicios y afectaciones de orden humano, material o de otra índole que provocaría su potencial destrucción y salida de servicio, la clase del cimientto en que se asiente, la altura de la misma, el material con que se construya, el volumen que almacene, y otras.

3.7.1 Clase del cimientto: la que califique la capacidad soportante de un cimientto, y los parámetros físico mecánicos del material que lo componga.

3.8 Período de retorno (o de recurrencia): intervalo de tiempo (generalmente medido en años), en que según cálculos o deducciones estadísticas, probablemente se reproducirá una crecida de una determinada magnitud.

3.9 Crecida Máxima Probable (CMP): la crecida que transita por una sección dada de una cuenca (y en particular, la que ingresa al embalse de una presa de almacenamiento o al tramo de aguas arriba de una presa de derivación), en respuesta a la formación de la Tormenta Máxima Probable, como consecuencia de la transformación que experimentan en la red hidrográfica de la cuenca los parámetros hidrológicos provocados por dicha tormenta.

3.9.1 Tormenta Máxima Probable (TMP): la tormenta que se provoca por el impacto de la Precipitación Máxima Probable en una cuenca, con una distribución temporal y una distribución espacial dadas.

3.9.2 Precipitación Máxima Probable (PMP): la mayor precipitación que teóricamente puede producirse desde el punto físico con una duración dada en una región de superficie dada, en una fecha determinada del año.

4 Lista de símbolos

En la presente NC 974: 2013, se emplean los símbolos de la siguiente tabla, así como los relacionados en la NC 48-03 y la NC 59: 2000 que no figuren en la siguiente relación.

b_{rot}	: ancho medio final de rotura de una presa (en m);
H_{max}	: carga máxima de vertimiento por un aliviadero (en m);
H_o	: carga máxima de cálculo de las obras de protección, entendida como la diferencia entre los niveles del agua en las inmediaciones de la obra, en los tramos de aguas arriba y aguas abajo de la misma (en m);
h	: altura de una presa, micropresa o tranque de almacenamiento, de una presa de derivación o de un muro de contención que forme parte de un frente de carga, entendida como la diferencia entre la cota de su coronación o extremo superior, y la de su base (en m);
h_{rot}	: altura de rotura de una presa, medida desde el lecho del embalse hasta la coronación (en m);
N	: vida útil de una obra (en años);
p	: probabilidad de superación de una crecida, un gasto o un volumen de cálculo (en por ciento);
Q_{max}	: gasto máximo de un hidrograma transformado (en m ³ /s);
Q_{pico}	: gasto pico (o gasto punta) de una crecida natural (en m ³ /s);
R	: riesgo de superación de una crecida, un gasto o un volumen de cálculo (adim.);
T	: período de retorno o recurrencia correspondiente a la probabilidad p (en años);
T_{rot}	: en los casos de apertura total de una brecha de rotura, tiempo estimado que medie entre el inicio de la formación de la brecha, y el instante en que ésta alcance su estado final (en h);
V_{ave}	: volumen de agua transportado por una crecida (en hm ³);
W	: volumen de agua almacenado en un embalse (en hm ³);
W_{rot}	: volumen de rotura de una presa, entendido como el volumen que se haya acumulado en el embalse hasta el nivel de la coronación, en el momento en que se inicie la formación de la brecha (en hm ³).

5 Principios generales de clasificación de las obras hidráulicas

Las obras hidráulicas se destinan a aprovechar los recursos hídricos presentes en la naturaleza en los ríos, lagos, mares y depósitos subterráneos, o a evitar o mitigar los efectos perjudiciales que el

agua pueda ocasionar sobre la población y el medio ambiente, como son las inundaciones, las socavaciones de las márgenes y otras manifestaciones. Estos objetivos se logran mediante la construcción de embalses y diques de protección, la regulación de los niveles de las aguas, el desvío y encauzamiento de sus caudales, el control de los sedimentos transportados por las mismas, y muchas otras acciones de carácter socioeconómico y medioambiental, lo que obliga a construir obras hidráulicas de muy diversa índole, y en múltiples escenarios naturales o socioculturales.

Atendiendo al lugar en que se construyan, las obras hidráulicas pueden ser fluviales, lacustres, marítimas, subterráneas o de otros tipos, y formar parte de sistemas o redes, como las que se construyen, por ejemplo, para el mejoramiento de los terrenos, que cuentan con obras hidráulicas de regulación, conducción y enlace.

En dependencia de la función que realicen, y de su interacción con el medio, existen obras hidráulicas de almacenamiento o de derivación, como las presas; de protección, como los diques que se levantan con estos fines; de conducción, como los canales, los túneles hidrotécnicos, las tuberías, las canaletas y otras; de captación, como las que se crean para tomar el agua de una corriente o un depósito; de evacuación, como los aliviaderos y los desagües de fondo; de entrega, como las obras de toma; de regulación, de rectificación y muchas otras.

Los propósitos que se satisfacen con la construcción de las obras hidráulicas, permiten clasificarlas en obras de aplicación múltiple o específica. Las primeras encuentran aplicación en disímiles campos, como en los casos constituidos por las obras de retención o derivación, y las de conducción, evacuación y regulación, mientras las segundas están representadas por las obras hidráulicas de mejoramiento de los terrenos (canales y estaciones de bombeo para el riego, el drenaje o la desecación); las que se destinan a la producción de energía eléctrica (como las estaciones hidroeléctricas, los túneles hidroenergéticos, los canales de derivación); las obras para el transporte acuático (como los canales de navegación y las esclusas) y el transporte de almadías; las obras piscícolas, destinadas al paso o la cría de peces; las obras de acueductos y alcantarillados, que incluyen canales, estaciones de bombeo, plantas de tratamiento y otras; las obras de protección contra las inundaciones, los deslaves y la erosión; las que permiten explotar las aguas subterráneas, y muchas otras. Cada vez con mayor frecuencia se crean obras hidráulicas complejas, capaces de enfrentar y satisfacer simultáneamente varias de estas funciones.

Según las condiciones de su empleo, las obras hidráulicas fluviales pueden clasificarse como permanentes o temporales. Se consideran como obras permanentes, las que constituyen partes fundamentales de los conjuntos hidráulicos o de combinaciones de obras que revistan una mayor complejidad, y que resultan necesarias durante toda la vida útil de dichos conjuntos o combinaciones, y como obras temporales, las que funcionan únicamente durante los períodos de construcción o de reparación de las obras permanentes, pero que no resultan necesarias cuando la explotación de estas últimas transcurre en condiciones normales de funcionamiento.

A su vez, las obras permanentes pueden ser principales o secundarias. A los efectos de la presente Norma, se consideran como **obras hidráulicas permanentes principales**, aquéllas que al interrumpir su funcionamiento, por reparaciones o por la ocurrencia de averías, provocan el anegamiento de las áreas que se encuentren bajo protección, drenaje o desecación, el cese total o una disminución considerable y prolongada de las entregas de agua a los diferentes usuarios, la paralización de las centrales hidroeléctricas, u otros perjuicios. Estas obras son:

- las presas, las micropresas y los tranques de almacenamiento;
- las presas de derivación;
- los estribos y los muros de contención que formen parte de frentes de carga;
- los diques de protección que formen parte de frentes de carga;
- las obras de protección de las márgenes de los embalses;
- los aliviaderos;
- las obras de toma y desagües de fondo;
- los canales magistrales, de derivación o de navegación, y sus obras auxiliares, tales como los sifones, los puentes y otras;
- los túneles hidrotécnicos;
- las conductoras principales;
- los embalses de carga de las estaciones hidroeléctricas y las chimeneas de equilibrio;
- las centrales hidroeléctricas y las hidroacumuladoras;
- las estaciones de bombeo;
- las obras contra inundaciones; y
- los diques contra lodos y residuos industriales.

Se consideran como **obras hidráulicas permanentes secundarias**, aquéllas en las cuales la interrupción de su funcionamiento no provoca las consecuencias señaladas anteriormente, en el caso de las obras principales. Estas obras son:

- los muros y diques separadores o deflectores;
- las compuertas de reparación;
- los estribos y los muros de contención que no formen parte de frentes de carga;
- las obras de protección para la cría de peces;
- las obras de reforzamiento de márgenes; y
- otras obras no incluidas entre las principales.

En varios aspectos, esta última clasificación tiene un carácter relativo, y por eso, en dependencia de las características particulares que presente un objeto de obra, su clasificación puede pasar de la de obra principal a la de obra secundaria, o viceversa.

Por último, se conceptúan como **obras hidráulicas temporales**, las ataguías que se levantan para el desvío de los ríos, los canales de desvío y otras obras de protección.

La experiencia del diseño, la construcción y la explotación de las obras hidráulicas, y en particular de las presas, ha sentado principios en los que se fundamentan, tanto la categorización de las mismas y de sus obras asociadas, desde el punto de vista de su proyección, como los requerimientos que acompañan a cada una de dichas categorías. La presente Norma implementa estos principios y requerimientos en una forma clara y coherente, que puede ser aplicada de forma confiable en la práctica moderna de la proyección de dichas obras de ingeniería, así como de la revisión, el rediseño y la remodelación de las obras ya existentes, en los casos necesarios.

6 Determinación de las categorías de proyección de las obras hidráulicas, y en particular, de las presas y obras asociadas

6.1 Sobre la base de lo expuesto en el apartado anterior, de acuerdo con la clasificación a la que pertenezca una obra hidráulica y a sus características fundamentales, le corresponderá una categoría de proyección, determinada por una escala de cinco categorías I, II, III, IV y V que se ordenan de forma decreciente, según el nivel de exigencias que las acompañe.

6.2 Así, las Tablas 1A y 1B recogen las categorías de proyección de las obras hidráulicas destinadas específicamente a la protección de objetivos socioeconómicos, incluyendo la rectificación de ríos, en dependencia de los objetivos de la protección, así como de la carga máxima de cálculo H_o , definida como la diferencia entre los niveles del agua en las inmediaciones de la obra, en los tramos de aguas arriba y aguas abajo de esta última.

6.3 La Tabla 2, por su parte, indica las categorías que se deben asignar a las obras permanentes, principales o secundarias, en dependencia de las afectaciones que provocaría su potencial destrucción. Nótese que salvo en el caso muy especial de las centrales atomoeléctricas, las categorías de proyección de las obras secundarias se deben establecer disminuyendo en un grado las correspondientes a las obras del mismo tipo que sean principales, pero que nunca deberán superar a la categoría III, ni ser inferiores a la categoría IV.

6.4 Por último, las categorías de proyección de las obras hidráulicas permanentes principales, que son contempladas especialmente en esta Norma, deberán establecerse por medio de la Tabla 3, en función de la clase del cimiento, de la altura h de la presa, micropresa o tranque de almacenamiento, de la presa de derivación, o del muro de contención que forme parte de un frente de carga, entendiendo como dicha altura la diferencia entre la cota de su coronación o extremo superior, y la de su base, y aún del volumen W de los embalses creados por las obras de almacenamiento, como se especifica en las notas que acompañan a la tabla. Si al aplicar las Tablas 1A, 1B, 2 y 3 se obtienen distintas categorías de proyección, se adoptará la mayor de ellas.

6.5 En los casos en que la potencial destrucción de una obra hidráulica permanente pueda provocar daños catastróficos a poblaciones; a centros industriales que sean vitales para la economía, tales como las centrales atomoeléctricas, las centrales termoeléctricas, las hidroacumuladoras, las industrias de carácter único y otros; o a vías de comunicación imprescindibles, el grado de importancia de su categoría de proyección deberá aumentarse, *tanto como sea necesario*, en correspondencia con la escala de los daños previstos, y mediante una detallada argumentación.

6.6 En los casos en que la potencial destrucción de una obra hidráulica permanente pueda provocar daños catastróficos a vías de comunicación de interés, a centros industriales que aún siendo importantes no resulten vitales para la economía, o a entornos históricos o ecológicos de especial significación, la importancia de su categoría de proyección podrá aumentarse *en un grado*, mediante una adecuada argumentación. No obstante, si con ese aumento de categoría el valor de la obra supera al de las vías o centros amenazados, no se podrá aumentar la categoría de proyección de la obra en cuestión.

6.7 Por el contrario, si los tramos de aguas abajo de las obras con categoría de proyección III de la Tabla 3, están despoblados, o si dichas obras se levantan junto al mar, y en caso de destrucción no ocasionarán daños catastróficos, la importancia de su categoría de proyección podrá disminuirse *en un grado*, con una argumentación apropiada.

6.8 La categoría de proyección de las obras hidráulicas permanentes que realicen varias funciones de distintas categorías, se deberá considerar igual a la categoría de mayor importancia.

6.9 Con una fundamentación adecuada, las obras hidráulicas temporales (es decir, de construcción o reparación) pueden insertarse entre las de IV categoría, sobre todo si su afectación puede ocasionar la inundación de áreas que se empleen para la construcción o la reparación, u otras consecuencias de carácter grave. En adición a esto, en los casos en que las obras

principales a las que ellas estén asociadas pertenezcan a las categorías I, II ó III, las obras temporales, en especial las ataguías y los aliviaderos destinados al período de construcción, deberán considerarse de III categoría, cuando su potencial destrucción sea capaz de ocasionar daños catastróficos a poblaciones, objetivos socioeconómicos, vías de comunicación, entornos históricos o ecológicos de especial significación, o a otras obras, o retrasar considerablemente la ejecución de las obras principales correspondientes.

6.10 La categoría de proyección de los canales magistrales, podrá reducirse a la inmediata inferior en importancia, en los casos en que aún cuando ocurra la destrucción de los mismos, el servicio que prestan se pueda mantener por algún medio, hasta tanto el canal sea reparado, y que los usuarios no sufran afectaciones de gran consideración.

6.11 Asimismo, la categoría de proyección de las obras hidráulicas de los sistemas de riego, podrá reducirse a la de importancia inmediata inferior, cuando se prevea que el plazo de servicio de los sistemas será inferior a 10 años, contados desde la puesta en explotación de las obras

6.12 La categoría de proyección de las obras hidráulicas podrá incrementarse también, tanto como sea necesario, en importancia, por imperativos de la defensa del país. En esos casos, la decisión corresponderá a la instancia máxima del organismo que esté a cargo de la proyección hidráulica de la obra en cuestión.

6.13 En un mismo conjunto hidráulico pueden encontrarse objetos de obra, cuyas categorías de proyección difieran entre sí. Se considerará como categoría de proyección del conjunto, la de mayor importancia entre las categorías correspondientes a las obras que lo compongan.

6.14 De igual modo, se considerará como categoría de proyección de un trasvase, la más importante de las categorías correspondientes a las obras que estén comprendidas en el mismo.

Tabla 1A — Categorías de proyección de los diques de protección contra inundaciones, en dependencia de los objetivos de la protección, y de su altura

Objetivo de la protección	Categoría, en dependencia de la carga máxima de cálculo H_o , dada en metros			
	I	II	III	IV
Protección contra inundaciones y protección contra lodos, en dependencia de la densidad de la población (en habitantes por kilómetro cuadrado):				
- más de 2 500	---	$H_o \geq 5$	$H_o < 5$	---
- de 2 100 a 2 500	---	$H_o \geq 8$	$2 \leq H_o < 8$	$H_o < 2$
- de 1 800 a 2 100	---	$H_o \geq 8$	$5 \leq H_o < 8$	$H_o < 5$
- menos de 1 800	---	$H_o \geq 10$	$8 \leq H_o < 10$	$H_o < 8$
Protección para la recreación; protección sanitaria	---	---	$H_o \geq 10$	$H_o < 10$
Protección a industrias, en dependencia del volumen de producción anual de estas últimas, en millones de pesos:				
- más de 500	---	$H_o \geq 5$	$H_o < 5$	---
- de 100 a 500	---	$H_o \geq 8$	$2 \leq H_o < 8$	$H_o < 2$
- menos de 100	---	$H_o \geq 8$	$5 \leq H_o < 8$	$H_o < 5$
Protección a objetivos económicos comunales y a depósitos:				
- empresas comunales, almacenes en ciudades	---	$H_o = 8$	$5 \leq H_o < 8$	$H_o < 5$
- otros	---	$H_o \geq 8$	$5 \leq H_o < 8$	$H_o < 5$
NOTA Con una argumentación adecuada, y la aprobación de la instancia máxima del organismo a cargo de la proyección hidráulica de la obra, se puede asignar la categoría I a las obras de protección, cuya potencial destrucción pueda provocar consecuencias catastróficas para la población, la economía o el transporte.				

Tabla 1B — Categorías de proyección de las obras de rectificación de ríos, y de los canales de protección contra inundaciones, en dependencia de los objetivos de la protección

Objetivo de la protección	Categoría	
	Principales	Secundarias
Protección contra inundaciones y protección contra lodos, en dependencia de la densidad de la población (en habitantes por kilómetro cuadrado):		
- más de 20 000	III	IV
- de 20 000 a 5 000	IV	V
- menos de 5 000	V	V
Protección para la recreación; protección sanitaria	IV	IV
Protección a industrias, en dependencia del volumen de producción anual de estas últimas, en millones de pesos:		
- más de 100	III	IV
- de 100 a 50	IV	V
- menos de 50	V	V
Protección a objetivos económicos comunales y a depósitos:		
- empresas comunales, almacenes en ciudades	IV	V

Tabla 2 — Categorías de proyección de distintos tipos de obras hidráulicas permanentes, en dependencia de las afectaciones que provocaría su potencial destrucción y salida de servicio

Tipo de obra	Categoría	
	Principales	Secundarias
Obras hidráulicas de las centrales hidroeléctricas, las centrales termoeléctricas y las hidroacumuladoras, en dependencia de la potencia instalada, en megawatts:		
- más de 500	I	III
- entre 50 y 500	II	III
- entre 5 y 50	III	III
- menos de 5	IV	IV
Obras hidráulicas de las centrales atomoeléctricas, con independencia de su potencia	I	I
Obras hidráulicas de los sistemas de mejoramiento de los suelos, en dependencia del área de riego y/o de drenaje, en miles de hectáreas:		
- más de 100	I	III
- entre 50 y 100	II	III
- entre 10 y 50	III	III
- menos de 10	IV	IV
Obras hidráulicas para la creación de embalses, en dependencia de su volumen de almacenamiento W , en millones de metros cúbicos:		
- más de 1000	I	III
- entre 200 y 1000	II	III
- entre 3 y 200	III	III
- entre 0,15 y 3	IV	IV
- menos de 0,15	V	V
Canales de uso múltiple (incluyendo sus obras auxiliares), en dependencia del gasto de diseño, en metros cúbicos por segundo, o del volumen a traspasar por ellos, en hectómetros cúbicos:		
- igual a $25 \text{ m}^3/\text{s}$ o 200 hm^3 , o mayor	III	IV
- menor de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ o 200 hm^3	IV	IV

Tabla 3 — Categorías de proyección de las obras hidráulicas permanentes principales contempladas en la Norma, de acuerdo con la clase del cemento, con la altura h y con el volumen de almacenamiento W

Tipo de obra	Clase del cemento ⁽¹⁾	I	II	III ^(2,3)	IV ⁽⁴⁾	V ⁽⁵⁾
Presas, micropresas y tranques de almacenamiento de materiales locales	A B C	$h \geq 100$ $h \geq 75$ $h \geq 50$	$100 > h \geq 70$ $75 > h \geq 30$ $50 > h \geq 25$	$70 > h \geq 15$ $30 > h \geq 15$ $25 > h \geq 15$	$15 > h \geq 6$ y $3 > W \geq 0,15$	$h < 6$ ó $W < 0,15$
Presas de derivación de materiales locales	A B C	$h \geq 100$ $h \geq 75$ $h \geq 50$	$100 > h \geq 70$ $75 > h \geq 30$ $50 > h \geq 25$	$70 > h \geq 15$ $30 > h \geq 15$ $25 > h \geq 15$	$15 > h \geq 6$	$h < 6$
Presas, micropresas y tranques de almacenamiento de hormigón u hormigón armado, y otras obras de hormigón u hormigón armado que formen parte de frentes de carga (con excepción de los muros de contención); esclusas; estructuras de los edificios de las centrales hidroeléctricas sometidas a cargas hidráulicas	A B C	$h \geq 100$ $h \geq 50$ $h \geq 25$	$100 > h \geq 60$ $50 > h \geq 25$ $25 > h \geq 20$	$60 > h \geq 15$ $25 > h \geq 15$ $20 > h \geq 15$	$15 > h \geq 6$ y $3 > W \geq 0,15$	$h < 6$ ó $W < 0,15$
Presas de derivación de hormigón u hormigón armado	A B C	$h \geq 100$ $h \geq 50$ $h \geq 25$	$100 > h \geq 60$ $50 > h \geq 25$ $25 > h \geq 20$	$60 > h \geq 15$ $25 > h \geq 15$ $20 > h \geq 15$	$15 > h \geq 6$	$h < 6$
Muros de contención que formen parte de frentes de carga	A B C	$h \geq 40$ $h \geq 30$ $h \geq 25$	$40 > h \geq 25$ $30 > h \geq 20$ $25 > h \geq 17,5$	$25 > h \geq 15$ $20 > h \geq 10$ $17,5 > h \geq 10$	$15 > h \geq 6$ $10 > h \geq 6$ $10 > h \geq 6$	$h < 6$ $h < 6$ $h < 6$
NOTAS						
(1) Las clases de cementos A, B y C se definen en la Tabla 3A.						
(2) Se inscribirán en las categorías I, II ó III, y se conceptuarán como <i>presas</i> , las obras de almacenamiento con alturas $h \geq 15$ m, con independencia del volumen de almacenamiento de sus embalses.						
(3) Se inscribirán asimismo en la categoría III, y conceptuarán también como <i>presas</i> , las obras de almacenamiento con alturas $h < 15$ m, pero con volúmenes de almacenamiento $W \geq 3$ hm ³ .						
(4) Se inscribirán en la categoría IV, y se conceptuarán como <i>micropresas</i> , las obras de almacenamiento que se caractericen simultáneamente por presentar alturas $15 \text{ m} > h \geq 6$ m y volúmenes de almacenamiento $3 \text{ hm}^3 > W \geq 0,15 \text{ hm}^3$.						
(5) Se inscribirán en la categoría V, y se conceptuarán como <i>tranques</i> , las obras de almacenamiento que se caractericen, indistintamente, por presentar alturas $h < 6$ m o volúmenes de almacenamiento $W < 0,15 \text{ hm}^3$.						

7 Influencia de las clases de cimientos en las categorías de proyección de las obras hidráulicas

7.1 Las Tablas 1A y 1B, 2 y 3, y las consideraciones que las complementan, muestran que para categorizar las obras hidráulicas sobre la base de diferentes criterios, se toman en cuenta factores tales, como las consecuencias de orden humano o material que provocaría la afectación o potencial destrucción de dichas obras, los perjuicios sociales, económicos, ecológicos o de otra índole que se derivarían de lo anterior y de la interrupción de las funciones que dependan de la explotación normal de las mismas, los materiales que se empleen para su construcción, así como el tipo de cemento en que se asienten las obras, la altura de estas últimas y, en el caso de las obras de almacenamiento, los volúmenes correspondientes. La sola mención de estos factores pone de manifiesto la responsabilidad que se contrae al proyectar y construir estos tipos de obras hidráulicas, y lo injustificado y nocivo de reducir en importancia la categoría de las mismas, en busca de economías, pero en detrimento de su seguridad y de la seguridad de su entorno. En ese sentido, los procedimientos y consideraciones expuestas en el apartado anterior para determinar la categoría de proyección que se debe asignar a una obra, no sólo deben ser interpretados en su justa medida y cumplidos cabalmente, sino además acompañarse y conjugarse con el análisis de todos los factores concomitantes que puedan ser evaluados en cada caso concreto.

7.2 Al respecto, la experiencia ha demostrado que muchas de las averías experimentadas por las presas a nivel internacional, se han debido a una selección inadecuada de los cierres en lugares con cimientos inapropiados, e incluso defectuosos, a una investigación deficiente de las características de los cimientos, o a un tratamiento inadecuado de los mismos y fallos en la adopción de las medidas del caso, y que varias de las averías que inicialmente fueron atribuidas a causas de otra índole, se generaron precisamente por estas circunstancias.

En este sentido, como se indica al final de la Tabla 3, la misma se ha complementado con la Tabla 3A, donde se describen las clases de cimientos que en la primera se simbolizan con las letras A, B y C, ordenados en forma decreciente por su capacidad soportante e indicadores físico mecánicos.

Tabla 3A — Clases de cimientos a considerar para establecer las categorías de proyección de las obras hidráulicas permanentes principales, contempladas en la Norma

Clase del cimiento	Descripción
A	Rocas sanas
B	Rocas meteorizadas, conglomerados rocosos, semirrocas
	Suelos sueltos de fracciones gruesas
	Suelos arcillosos compactos de consistencia dura o medianamente dura
C	Suelos arcillosos plásticos saturados

7.3 Las especificaciones de la Tabla 3 han permitido trazar los gráficos de las Figuras 1a, 1b y 1c, para evidenciar la dependencia fijada por la Norma entre la categoría de proyección de la obra, y la clase del cemento en que ella se apoye, así como el determinante efecto que ejerce también la altura de la misma, y la influencia debida al volumen de almacenamiento en las presas, micropresas y tranques destinados a ese objetivo. Los gráficos facilitan la determinación de la categoría apropiada de proyección.

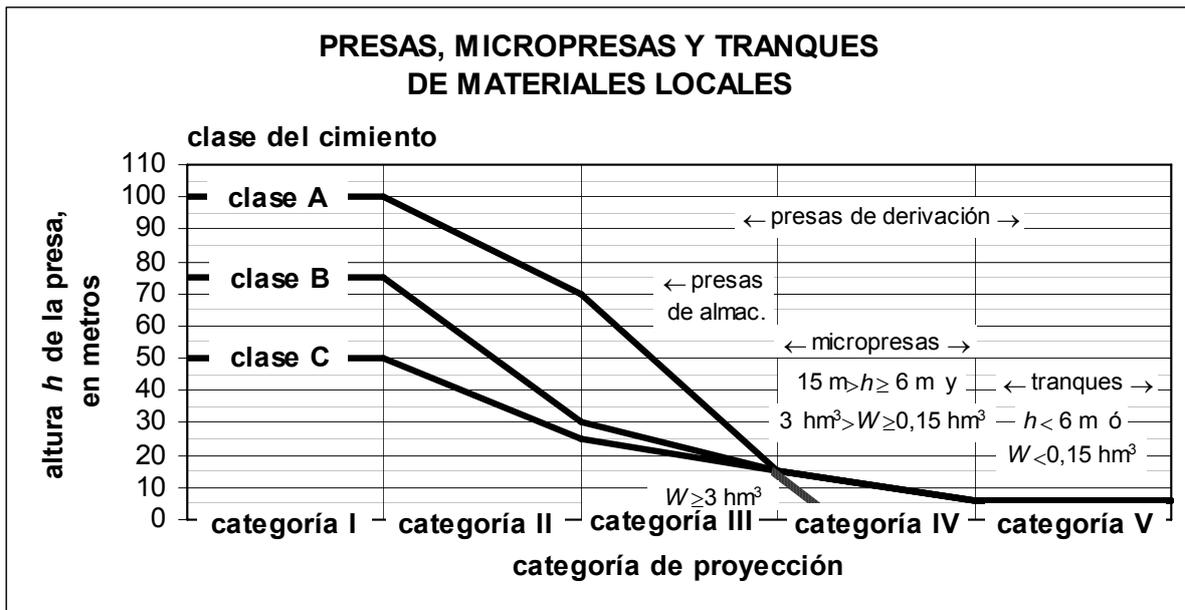


Figura 1a

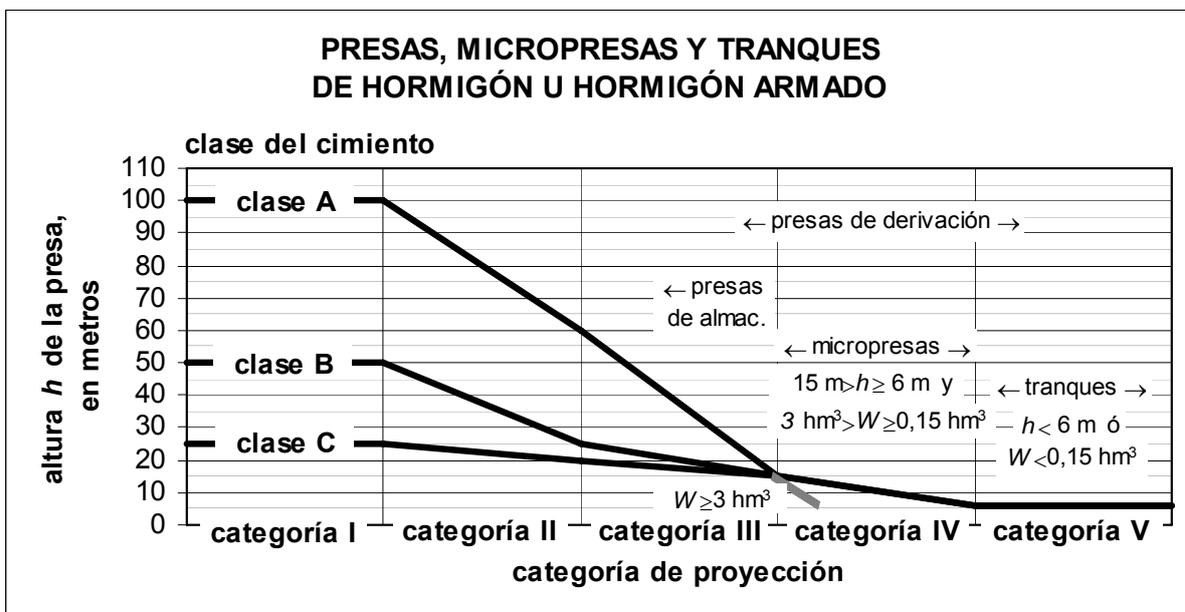


Figura 1b

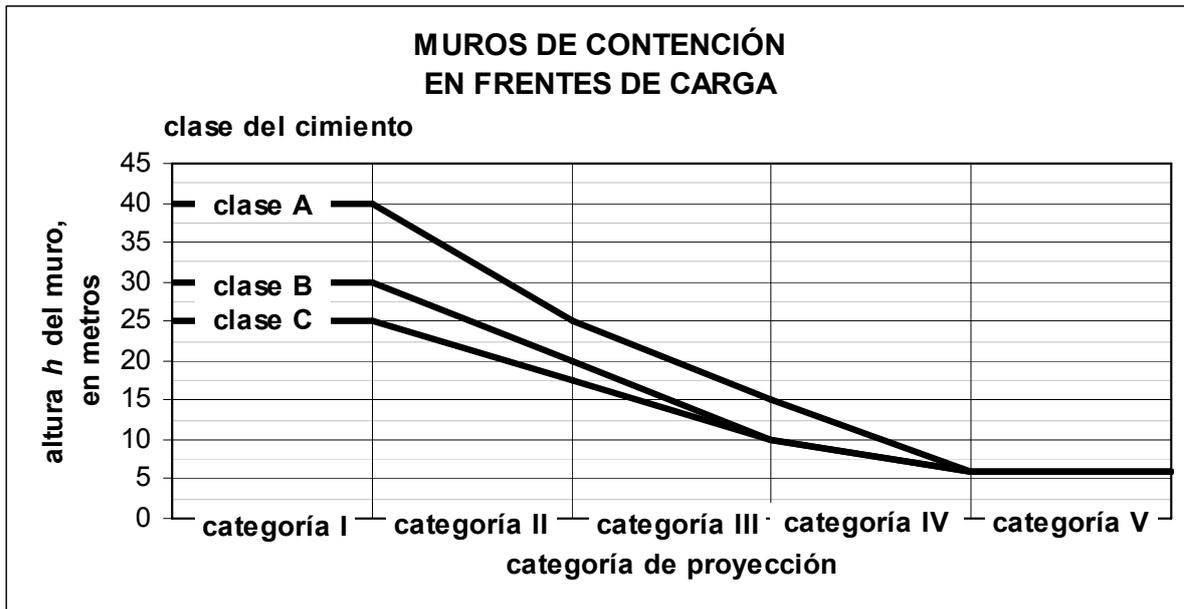


Figura 1c

8 Obligaciones que imponen las categorías de proyección. Determinación de las probabilidades de superación de las crecidas extremas a evacuar por las estructuras de servicio de las presas y obras asociadas

8.1 La asignación de categorías de proyección a las obras hidráulicas, comporta el cumplimiento de las especificaciones correspondientes a dichas categorías, que aparecen fijadas en los documentos normativos e indicaciones que rigen los diferentes aspectos de la proyección estructural, la construcción y la puesta en explotación de dichas obras, y que deberán aplicarse a partir de dichos documentos.

En particular, en el caso de las presas de materiales locales o de hormigón u hormigón armado, por la importancia de este tipo de obras y su relevante incidencia en la sociedad, la economía y el medio ambiente, la Norma incluye el análisis de las consecuencias que comporta el establecimiento de una u otra categoría de proyección, para el dimensionamiento de sus estructuras de servicio y evacuación, es decir, de los aliviaderos, obras de toma y desagües de fondo.

8.2 El Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD) ha concluido que más de la tercera parte de las catástrofes que se han provocado a nivel mundial por la destrucción de presas, se ha originado en la incapacidad de sus aliviaderos para evacuar apropiadamente las grandes crecidas que han ingresado a los embalses, y evitar que los niveles del agua crecieran en estos últimos hasta rebasar la coronación de las presas y provocaran su destrucción parcial, o su colapso total, ocasionando que las aguas retenidas en los embalses irrumpieran aguas abajo y provocaran olas de rotura, que al avanzar y extenderse rápidamente por dichos tramos, ocasionaron inundaciones y cuantiosos daños. Algunos autores consideran que junto al diseño hidráulico inapropiado de los aliviaderos, en estas roturas jugó un papel de primer orden el conocimiento deficiente, y el mal uso, de los datos hidrológicos.

Ha quedado establecido, que la rotura de las presas de hormigón transcurre con la formación de una brecha, que en tan sólo 5 min a 15 min alcanza un ancho que en la media es igual a 1/3 de la longitud total de la coronación, o a la suma de los anchos de los 3 bloques de la presa que al momento de la rotura, se ubicaban sobre el cauce del río. Por el contrario, en el caso de las presas de materiales locales, como las construidas en Cuba, las observaciones de campo y de laboratorio han mostrado que la rotura tiene un carácter gradual, que la brecha progresa rápidamente, tanto en sentido vertical como horizontal, y que si alcanza a desarrollarse totalmente, se extiende hasta el punto más bajo de la cortina, adopta una forma trapezoidal con taludes de inclinación 1:1, y se estabiliza al ampliarse, hasta llegar a un ancho medio final de rotura b_{rot} que se puede estimar como:

$$b_{br} = 20 \sqrt[4]{W_{rot} h_{rot}} \quad (1)$$

donde la altura h_{rot} , medida hasta la coronación, se expresa en metros [m], b_{br} se obtiene en metros [m], y W_{rot} , que se debe sustituir en hectómetros cúbicos [hm^3] (millones de metros cúbicos), es el volumen acumulado en el embalse hasta el nivel de la coronación, en el momento en que se inicie la formación de la brecha.

Como consecuencia de lo anterior, si en las presas de hormigón la apertura de la brecha prácticamente es súbita, en las presas de materiales locales la velocidad con que transcurre su apertura está condicionada por la erosión del material que las componga, y por el desprendimiento cada vez más intenso de agregados y bloques del mismo. Los procesamientos estadísticos han permitido concluir, que en los casos de aperturas totales de la brecha, el tiempo estimado T_{rot} que media entre el inicio de su formación, y el instante en que alcanzará su estado final, responde a la fórmula:

$$T_{rot} = 4,8 \frac{\sqrt{W_{rot}}}{h_{rot}} \quad (2)$$

donde como antes, W_{rot} y h_{rot} se expresan en hectómetros cúbicos [hm^3] y en metros [m], respectivamente, mientras el tiempo de rotura T_{rot} se obtiene en horas [h].

La aplicación de estas expresiones a algo menos de las 242 obras de almacenamiento construidas en Cuba, que a la redacción de la Norma eran administradas por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, entre las que se incluyen presas, micropresas y tranques, y algunas presas derivadoras, y de las cuales la gran mayoría se enmarcan en las categorías III, IV y V, y menos del 10 % pertenece a las categorías I y II definidas en esta Norma, muestra que en el 60 % del total de la muestra, se debe esperar que el ancho medio de la brecha de rotura no supere los 100 m, pero que en 11 presas llegará a ser mayor de 200 m (205 m en Porvenir, 210 m en La Yaya, 215 m en Jimaguayú, 216 m en Avilés, 225 m en Moa, 233 m en Hanabanilla, 236 m en Carlos Manuel de Céspedes, 249 m en Cauto El Paso, 250 m en Alacranes, 251 m en Protesta de Baraguá, 292 m en Mayarí y 305 m en Zaza), y en casos como Moa, Mayarí, Hanabanilla y otros, comprometerá la totalidad de la presa. Por otra parte, a juzgar por la segunda expresión estadística, sólo en 7 presas el tiempo necesario para que acaezca la rotura total de la cortina sobrepasará las 4 h. Este tiempo será de 4,3 h, 4,5 h y 4,7 h en Porvenir (Camagüey), Cauto el Paso (Granma) y Zaza (Sancti Spíritus), y aumentará a 6,2 h en Alacranes, cuyo volumen W_{rot} al nivel de la corona, calculado en 1000 hm^3 , es superado únicamente por el de 1405 hm^3 correspondiente a la presa Zaza. Por otra parte, el tiempo de rotura será de 4,2 h, y hasta de 7,4 h y 8,4 h, en La Atalaya, y en

Laguna Grande y Cuyaguaje, cuyas cortinas se encuentran entre las más pequeñas del conjunto, con alturas respectivas de tan sólo 7,07 m, 4,20 m y 7,32 m, pero dan lugar, sin embargo, a volúmenes que son comparativamente muy grandes al nivel de las coronas. Como evidencia el gráfico de la Figura 2, en el 78 % de los casos analizados la destrucción total no deberá tomar más de 2 horas, y en el 33 % de todos los casos se producirá en no más de 1 hora, a partir de que se inicie el rebose de la cortina y comience a formarse la brecha. De este modo, se puede estimar que en caso de rebose, el 45 % de estas presas, prácticamente la mitad del total, quedarán completamente destruidas en un intervalo de tiempo comprendido entre 1 hora y 2 horas.

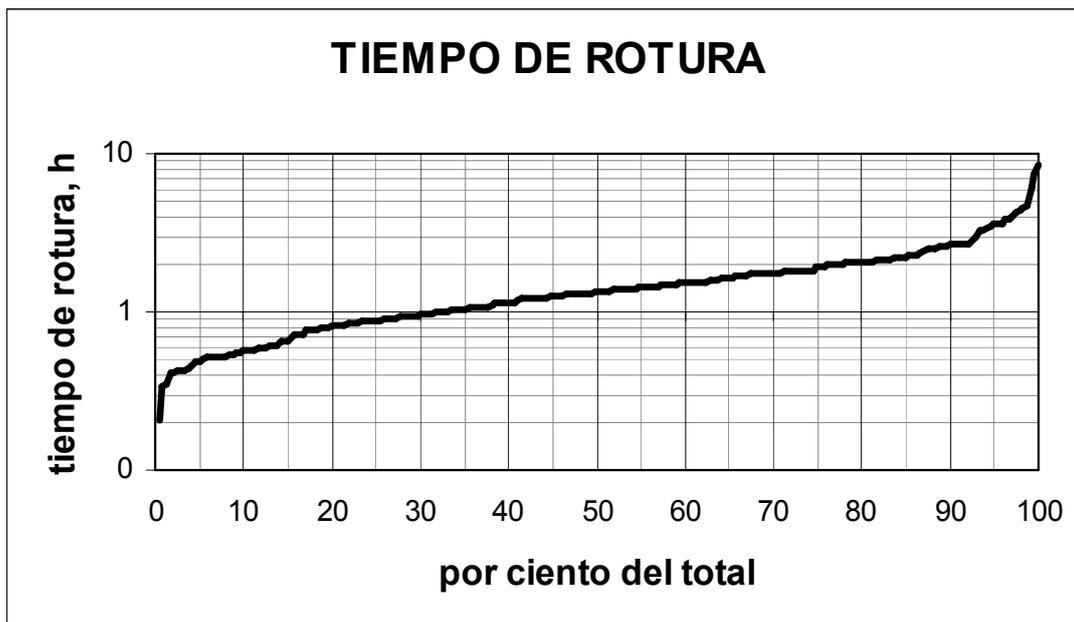


Figura 2 — Tiempo estimado de rotura por rebose, de las presas administradas en Cuba por el INRH

8.3 A la luz de las circunstancias y de los estimados expuestos, cobra una importancia de primer orden normar correctamente la determinación de los parámetros de cálculo de las crecidas que deberán ser evacuadas por los aliviaderos y otras estructuras de servicio y evacuación, cuyas características y dimensiones apropiadas deberán responder, tanto a aspectos hidráulicos y estructurales, como a los resultados de los análisis hidrológicos que se conduzcan al efecto.

Así, para proceder a la proyección estructural de las estructuras de servicio de las presas y obras asociadas, las crecidas extremas más desventajosas a evacuar por ellas se establecerán con probabilidades de superación p , que generalmente se expresan en por ciento, y que se deberán determinar, tanto en función de la categoría de la obra, como de las consecuencias que acarrearía la potencial destrucción de esta última, considerando dos situaciones fundamentales de cálculo: la situación de diseño y la situación o situaciones de comprobación. En la Tabla 4 se relacionan las probabilidades básicas que se deben adoptar en cada situación, en por ciento (y los períodos de retorno o recurrencia $T=100/p$ correspondientes, en años), en función de la categoría de la obra, es decir, de la clase de cimiento en que la misma se asiente, de su altura, y en lo concerniente a las categorías IV y V de las obras de almacenamiento, y en menor medida a la categoría III, también del volumen de almacenamiento, según se especificó en las Tablas 3 y 3A.

Tabla 4 — Probabilidades básicas p de superación de las crecidas extremas más desventajosas a evacuar por las estructuras de servicio de las presas y obras asociadas, de acuerdo con su categoría de proyección

Situación de cálculo	Probabilidad básica p de superación de las crecidas extremas más desventajosas (en por ciento), en dependencia de la categoría de proyección				
	I	II	III	IV	V
Diseño	0,1%	0,5%	1,0%	2,0%	4,0%
Comprobación probabilística	0,01%	0,1%	0,5%	1,0%	2,0%
Comprobación con la Crecida Máxima Probable CMP	CMP	CMP	CMP	---	---
	Período básico T de retorno o recurrencia de las crecidas extremas más desventajosas (en años), en dependencia de la categoría de proyección				
	I	II	III	IV	V
Diseño	1 000	200	100	50	25
Comprobación probabilística	10 000	1 000	200	100	50

8.4 A su vez, a estos efectos, con excepción de la categoría I, cada una de las restantes categorías se considerará dividida en subcategorías, y las probabilidades de superación de las crecidas extremas más desventajosas, tanto en las situaciones de diseño como en las de comprobación, tomarán también en cuenta las consecuencias que acarrearía la potencial destrucción de las obras, para la cual dichas probabilidades se establecerán como se expone a continuación:

Categoría I. Probabilidades de diseño y de comprobación probabilística: 0,1 % y 0,01 %.

(Sin subcategorías).

Categoría II. Probabilidades básicas de diseño y de comprobación probabilística: 0,5 % y 0,1 %.

- *Subcategoría II-1.* Probabilidades de diseño y de comprobación probabilística: 0,1 % y 0,01 %. Corresponde a las obras de almacenamiento o de derivación, cuya altura se enmarque en la mitad superior del rango de alturas correspondiente a la categoría II, con la clase de cimiento dado, y aguas abajo de las cuales, existan centros de población, objetivos económicos importantes o entornos históricos o ecológicos de especial significación, en riesgo por la eventual destrucción de la obra.

- *Subcategoría II-2.* Probabilidades de diseño y de comprobación probabilística: 0,5 % y 0,1 %. Corresponde a las obras de almacenamiento o de derivación, cuya altura se enmarque en la mitad superior del rango de alturas correspondiente a la categoría II, con la clase de cimiento dado, y aguas abajo de las cuales no haya población en riesgo, o ésta sea dispersa y escasa, y pueda ser evacuada con relativa rapidez y seguridad, y no hayan objetivos económicos importantes, ni entornos históricos o ecológicos de especial significación en riesgo, así como a las obras de almacenamiento o de derivación, cuya altura se enmarque en la mitad inferior del rango de alturas correspondiente a la categoría II, con la clase de cimiento dado, con independencia de la existencia o no, aguas abajo de las mismas, de población en riesgo o de objetivos económicos importantes o entornos históricos o ecológicos de especial significación.

Categoría III. Probabilidades básicas de diseño y de comprobación probabilística: 1,0 % y 0,5 %.

- *Subcategoría III-1.* Probabilidades de diseño y de comprobación probabilística: 0,5 % y 0,1 %. Corresponde a las obras de almacenamiento o de derivación, cuya altura se enmarque en la mitad

superior del rango de alturas correspondiente a la categoría III, con la clase de cimiento dado, y aguas abajo de las cuales, existan centros de población, objetivos económicos importantes o entornos históricos o ecológicos de especial significación, en riesgo por la eventual destrucción de la obra.

- *Subcategoría III-2.* Probabilidades de diseño y de comprobación probabilística: 1,0 % y 0,5 %. Corresponde a las obras de almacenamiento o de derivación, cuya altura se enmarque en la mitad superior del rango de alturas correspondiente a la categoría III, con la clase de cimiento dado, y aguas abajo de las cuales, no haya población en riesgo, o ésta sea dispersa y escasa, y pueda ser evacuada con relativa rapidez y seguridad, y no hayan objetivos económicos importantes, ni entornos históricos o ecológicos de especial significación en riesgo, así como a las obras de almacenamiento o de derivación, cuya altura se enmarque en la mitad inferior del rango de alturas correspondiente a la categoría III, con la clase de cimiento dado (o que en las obras de almacenamiento sea inferior a 15 m, si el volumen de almacenamiento W es igual o mayor que 3 hm^3), y aguas abajo de las cuales, existan centros de población, objetivos económicos importantes o entornos históricos o ecológicos de especial significación, en riesgo por la eventual destrucción de la obra.

- *Subcategoría III-3.* Probabilidades de diseño y de comprobación probabilística: 2,0 % y 1,0 %. Corresponde a las obras de almacenamiento o de derivación, cuya altura se enmarque en la mitad inferior del rango de alturas correspondiente a la categoría III, con la clase de cimiento dado (o que en las obras de almacenamiento sea inferior a 15 m, si el volumen de almacenamiento W es igual o mayor que 3 hm^3), y aguas abajo de las cuales, no haya población en riesgo, o ésta sea dispersa y escasa, y pueda ser evacuada con relativa rapidez y seguridad, y no hayan objetivos económicos importantes ni entornos históricos o ecológicos de especial significación en riesgo.

Categoría IV. Probabilidades básicas de diseño y de comprobación probabilística: 2,0 % y 1,0 %.

- *Subcategoría IV-1.* Probabilidades de diseño y de comprobación probabilística: 1,0 % y 0,5 %. Corresponde a las obras de almacenamiento, cuya altura o cuyo volumen de almacenamiento se enmarque en la mitad superior del rango de alturas, o de volúmenes, correspondiente a la categoría IV ($15 \text{ m} > h \geq 6 \text{ m}$; $3 \text{ hm}^3 > W \geq 0,15 \text{ hm}^3$), y a las obras de derivación, cuya altura se enmarque en la mitad superior del rango de alturas correspondiente a la categoría IV ($15 \text{ m} > h \geq 6 \text{ m}$), con cualquier clase de cimiento, y aguas abajo de las cuales, existan centros de población, objetivos económicos importantes o entornos históricos o ecológicos de especial significación, en riesgo por la eventual destrucción de la obra.

- *Subcategoría IV-2.* Probabilidades de diseño y de comprobación probabilística: 2,0 % y 1,0 %. Corresponde a las obras de almacenamiento, cuya altura o cuyo volumen de almacenamiento se enmarque en la mitad superior del rango de alturas, o de volúmenes, correspondiente a la categoría IV ($15 \text{ m} > h \geq 6 \text{ m}$; $3 \text{ hm}^3 > W \geq 0,15 \text{ hm}^3$), y a las obras de derivación, cuya altura se enmarque en la mitad superior del rango de alturas correspondiente a la categoría IV ($15 \text{ m} > h \geq 6 \text{ m}$), con cualquier clase de cimiento, y aguas abajo de las cuales, no haya población en riesgo, o ésta sea dispersa y escasa, y pueda ser evacuada con relativa rapidez y seguridad, y no hayan objetivos económicos importantes ni entornos históricos o ecológicos de especial significación en riesgo, así como a las obras de almacenamiento, cuya altura o cuyo volumen de almacenamiento se enmarque en la mitad inferior del rango de alturas, o de volúmenes, correspondiente a la categoría IV ($15 \text{ m} > h \geq 6 \text{ m}$; $3 \text{ hm}^3 > W \geq 0,15 \text{ hm}^3$), y a las obras de derivación, cuya altura se enmarque en la mitad inferior del rango de alturas correspondiente a la categoría IV

($15\text{ m} > h \geq 6\text{ m}$), con cualquier clase de cimiento, y aguas abajo de las cuales, existan centros de población, objetivos económicos importantes o entornos históricos o ecológicos de especial significación, en riesgo por la eventual destrucción de la obra.

- *Subcategoría IV-3.* Probabilidades de diseño y de comprobación probabilística: 3,0 % y 2,0 %. Corresponde a las obras de almacenamiento, cuya altura o cuyo volumen de almacenamiento se enmarque en la mitad inferior del rango de alturas, o de volúmenes, correspondiente a la categoría IV ($15\text{ m} > h \geq 6\text{ m}$; $3\text{ hm}^3 > W \geq 0,15\text{ hm}^3$), y a las obras de derivación, cuya altura se enmarque en la mitad inferior del rango de alturas correspondiente a la categoría IV ($15\text{ m} > h \geq 6\text{ m}$), con cualquier clase de cimiento, y aguas abajo de las cuales, no haya población en riesgo, o ésta sea dispersa y escasa, y pueda ser evacuada con relativa rapidez y seguridad, y no hayan objetivos económicos importantes ni entornos históricos o ecológicos de especial significación en riesgo.

Categoría V. Probabilidades básicas de diseño y de comprobación probabilística: 4,0 % y 2,0 %.

- *Subcategoría V-1.* Probabilidades de diseño y de comprobación probabilística: 3,0 % y 2,0 %. Corresponde a las obras de almacenamiento, cuya altura o cuyo volumen de almacenamiento se enmarque en los rangos de alturas y volúmenes correspondientes a la categoría V ($h < 6\text{ m}$; $W < 0,15\text{ hm}^3$), y a las obras de derivación, cuya altura se enmarque en el rango de alturas correspondiente a la categoría V ($h < 6\text{ m}$), con cualquier clase de cimiento, y aguas abajo de las cuales, existan centros de población, objetivos económicos importantes o entornos históricos o ecológicos de especial significación, en riesgo por la eventual destrucción de la obra.

- *Subcategoría V-2.* Probabilidades de diseño y de comprobación probabilística: 4,0 % y 2,0 %. Corresponde a las obras de almacenamiento, cuya altura o cuyo volumen de almacenamiento se enmarque en los rangos de alturas y volúmenes correspondientes a la categoría V ($h < 6\text{ m}$; $W < 0,15\text{ hm}^3$), y a las obras de derivación, cuya altura se enmarque en el rango de alturas correspondiente a la categoría V ($h < 6\text{ m}$), con cualquier clase de cimiento, y aguas abajo de las cuales, no haya población en riesgo, o ésta sea dispersa y escasa, y pueda ser evacuada con relativa rapidez y seguridad, y no hayan objetivos económicos importantes ni entornos históricos o ecológicos de especial significación en riesgo.

8.5 Al proyectar una obra hidráulica, la definición de una crecida de cálculo se puede llevar a cabo siguiendo tres enfoques fundamentales. El enfoque *probabilístico* asocia dicha crecida al riesgo R de que su parámetro característico representativo (el valor extremo Q_{pico} del gasto o el valor extremo V_{ave} del volumen, aunque en el segundo caso se precise contar con suficientes registros de hidrogramas), sea superado a lo largo de los N años de vida útil de la estructura, con una probabilidad p en por ciento (o un período de retorno $T=100/p$, en años) de que dicho gasto o volumen no sea superado en un año. Los valores de probabilidades y períodos de retorno que ocupan las filas correspondientes en cada sección de la Tabla 4, responden a esta concepción del problema, que ha sido adoptada tradicionalmente en Cuba y en otros países, empleando el gasto extremo como parámetro representativo de la crecida de cálculo, con el inconveniente de que la frecuente ausencia de registros de gastos extremos deba ser suplida por su estimación, a partir de series de gastos medios diarios, lo que introduce heterogeneidades e importantes incertidumbres en los datos de partida. Otra aproximación se basa en la confección de *curvas envolventes* de las mayores crecidas que se hayan registrado efectivamente, donde los gastos específicos (por unidad de área) se expresan en función del área de la cuenca, pero no se toma cuenta del período observado (es decir, de la probabilidad de cada suceso registrado), ni se consideran otros factores que junto al área, influyen en el problema, tales como las características del clima, la topografía del

terreno, el tipo de suelo y de cubierta vegetal, y otros, lo que generalmente provoca una apreciable dispersión de los puntos que se emplean para definir dichas curvas, que por su naturaleza son netamente empíricas. Por último, un tercer enfoque, que es el utilizado en los EE.UU. y en otros países, parte de aceptar la formación de la Crecida Máxima Probable (CMP), definida como aquella que se espera pueda producirse con la combinación más severa de condiciones que razonablemente sean posibles en un territorio o región dada, y que den lugar a la Tormenta Máxima Probable (TMP), como consecuencia del impacto de la Precipitación Máxima Probable (PMP) sobre dicho territorio o región. El empleo de modelos determinísticos permite entonces simular el proceso precipitación-escurrimiento a partir de los registros de precipitaciones, que habitualmente son más prolongados que los registros de aforos, y que poseen mucha mayor densidad espacial. El método presupone un enfoque claramente conservador del problema (en el que se adopte, por ejemplo, una elevada humedad antecedente del suelo, previa a la formación de la crecida), por lo que la aplicación de sus resultados a la proyección de las obras, introduce implícitamente un elevado factor de seguridad.

En atención a estas circunstancias, y al escenario hidrometeorológico actual, y tomando en cuenta las características de las redes pluviométrica e hidrométrica del país y de las bases de datos correspondientes, en la Norma se preserva el enfoque probabilístico al uso en Cuba, empleando para ello preferentemente los gastos extremos como parámetros representativos de las crecidas de diseño y de comprobación probabilística, y como se indica en la Tabla 4, se incorpora al mismo tiempo para la proyección de las obras de las categorías I, II y III, una segunda situación de comprobación, basada en la aceptación de que a la obra de almacenamiento o de derivación pueda ingresar la Crecida Máxima Probable que se origine como respuesta de la cuenca tributaria a la Precipitación Máxima Probable en el territorio o región de emplazamiento de la obra. Esta precipitación deberá ser establecida en cada caso, aplicando, de ser necesario, el principio de transposición, lo que se facilita con la Tabla 4A, donde se recogen los 46 eventos pluviosos más relevantes registrados en el archipiélago cubano entre octubre de 1963 (ciclón Flora) y julio del año 2013 de redacción definitiva de la Norma (depresión tropical Chantal). Aunque dicha relación, que no tiene un carácter concluyente, deberá complementarse constantemente, constituye una guía útil y confiable para lograr los objetivos expuestos.

8.7 A la vez que en la Norma se preserva el tratamiento de las crecidas extremas más desventajosas a partir de los valores del gasto, se subraya la importancia de mantener presente en cada caso el sesgo implícito en este enfoque del problema, y la imperiosa necesidad de que en cada proyecto se agoten todas las posibilidades para contrastar los resultados de dicho enfoque con los que se obtendrían mediante el análisis de los volúmenes de las crecidas extremas, empleando para ello los datos existentes y aplicando las mejores metodologías desarrolladas para estos fines. Esto último resulta particularmente importante en los casos en que se deba esperar la formación de crecidas extremas caracterizadas por la formación sucesiva de dos o más picos, descritas a partir de los datos existentes, o utilizando la metodología desarrollada a esos efectos por Alexeyev y Riazanov en 1973, que encabeza con el número {1} la relación de referencias bibliográficas incluida al final del documento, así como la contribución [23] publicada por Matakiev en ese mismo año. Una confirmación elocuente de esta última circunstancia, y de sus consecuencias, se expone en el Anexo A, donde se ilustran algunos aspectos relevantes de una alternativa de aliviaderos que fue concebida para la proyección de la presa Mayarí, tomando en cuenta, tanto los gastos extremos, como los volúmenes de las crecidas correspondientes a distintas probabilidades en el cierre de dicha presa, así como el peculiar comportamiento de la crecida de tres picos que fue generada por el impacto del ciclón Flora en octubre de 1963 (Tabla 4), que por sus especiales características constituye la Crecida Máxima Probable en ese territorio.

Tabla 4A — Principales tormentas extremas ocurridas en Cuba, entre el ciclón Flora (octubre de 1963) y la depresión tropical Chantal (julio del 2013)

Nº	Año, mes, día(s)	Nombre que ha trascendido	Principales provincias afectadas	Lluvias máximas mm		Pérdidas humanas hab.
				un día	total	
1	1963, oct. 4–8	<i>Flora</i>	CM, LT, HG, GR, SC	719	2 550	más de 2 000
2	1966, jun. 2–8	<i>Alma</i>	IJ, PR, HB, CH	245		11
3	1966, sep. 30 – oct. 1	<i>Inés</i>	SC, GR, CF, VC	330	416	4 (32)
4	1968, oct. 14–16	<i>Gladys</i>	IJ, PR, HB	358	358	6 (18)
5	1971, nov. 15–18	<i>Laura</i>	IJ, PR, HB, CH	487	825	1 (3)
6	1972, jun. 17–18	<i>Agnes</i>	IJ, PR	409	409	16 (24)
7	1978, oct. 17–19	Camajuaní	VC, SS	(360)		
8	1979, abr. 24–25	(s/n)	PR, HB	624		
9	1979, sep. 9	<i>Frederick</i>	HB, CH, MT, PR	630	870	
10	1981, nov. 5–6	<i>Katrina</i>	CM, CA	331	400	2
11	1982, jun. 1–4	<i>Alberto</i>	PR, HB	775	1 012	24 (17)
12	1982, jun. 18–19	Hondon. Bacuranao	CH, HB, PR	705	728	
13	1988, may. 31 – jun. 1	Cienfuegos	CF, VC, SS, CA, CM	867	1 025	37
14	1990, may. 25–29	(s/n)	SS	(388)	892	
15	1992, jun. 23–25	(s/n)	PR, HB, MT	610	849	
16	1993, may. 30 – jun. 1	Jobabo	GM, SC, GR, HG, LT	475		20
17	1993, nov. 23–25	Sagua–Guantánamo	SC, GM, HG	(600)	825	30
18	1994, may. 20–21	(s/n)	GM, HG	(325)		13
19	1994, nov. 12–13	<i>Gordon</i>	GM, HG	(395)		1
20	1995, jun. 1–4	<i>Allison</i>	PR, HB	384	456	3
21	1996, oct. 15–16	<i>Lili</i>	MT, CF, VC, SS	433	747	
22	1998, sep. 22–25	<i>Georges</i>	GM, HG, CM, MT	446	517	6
23	1999, oct. 13–14	<i>Irene</i>	HB, MT, CF, VC, SS	(700)	800	
24	2000, sep. 22	Orengo 22-09	CH	125		1
25	2000, dic. 24	Orengo Nochebuena	CH	(200)		
26	2001, nov. 4–5	<i>Michelle</i>	MT, CF, VC, SS	754		5
27	2002, may. 21	Orengo 21-05	CH	160		
28	2002, jun. 10–12	Zaza-Jatibonico	SS, CA, VC	640		
29	2002, sep. 18–22	<i>Isidore</i>	IJ, PR, HB, SS, SC	655	800	
30	2002, sep. 29 –oct. 1	<i>Lili</i>	IJ, PR, HB, MT	(340)		
31	2003, ago. 14–15	<i>Erika</i>	CH	(200)		
32	2004, ago. 12–13	<i>Charley</i>	IJ, HB, PR, CH	155		
33	2004, sep. 13	<i>Iván</i>	IJ, PR, HB	(400)		
34	2005, jun.	<i>Arlene</i>	IJ, PR, HB, CH, CF, SS	224	284	
35	2005, jul. 7–8	<i>Dennis</i>	SC, GR, SS, CF, VC, MT	783	1 092	14
36	2007, oct. 28 – nov. 3	<i>Noel</i>	GT, SC, GR, HG, LT	375	607	
37	2008, ago. 16–18	<i>Fay</i>	SS, VC, CF	431	487	
38	2008, ago. 25–31	<i>Gustav</i>	SS, CF, VC, MT, IJ, CH, HB, PR	320	450	
39	2008, sep. 6–10	<i>Ike</i>	todas las provincias	672	773	
40	2008, nov. 7–8	<i>Paloma</i>	CM, LT	401	405	
41	2010, sep. 28–30	<i>Nicole</i>	SS, CF, GR	307	422	
42	2012, may. 20–26	Hondonada s/n	SS, VC, CA	538	981	
43	2012, ago. 24–26	<i>Isaac</i>	GT, SC, HG, GR, VC, SS	366	450	
44	2012, oct. 23–26	<i>Sandy</i>	SC, GR, HG, SS, VC, CF	362	476	
45	2013, jun. 4–8	<i>Andrea</i>	PR	410	508	
46	2013, jul. 10–15	<i>Chantal</i>	LH, MB, MT, CF, VC	292	302	

(Ver notas a la Tabla en la siguiente página).

NOTAS A LA TABLA 4A

- Los nombres de los ciclones tropicales se identifican en cursivas.
- Las provincias se identifican con las siguientes siglas: PR- antigua provincia de Pinar del Río; HB- antigua provincia Habana; CH- antigua provincia de Ciudad de La Habana; AT- Artemisa; LH- actual provincia de La Habana; MB- Mayabeque; MT- Matanzas; CF- Cienfuegos; VC- Villa Clara; SS- Sancti Spíritus; CA- Ciego de Ávila; CM- Camagüey; LT- Las Tunas; HG- Holguín; GR- Granma; SC- Santiago de Cuba; GT- Guantánamo; IJ- Isla de la Juventud.
- Las provincias afectadas se han ordenado, fundamentalmente, siguiendo la trayectoria de la tormenta.
- Las lluvias en paréntesis son aproximadas de la lluvia, y presumiblemente menores que las reales.
- Junto a las víctimas fatales (fallecidos o desaparecidos), aparece en paréntesis el número de heridos.

8.8 Las consideraciones que se exponen al analizar el estudio de caso del Anexo A, corrobora a la vez que la transformación que experimentan los hidrogramas de las crecidas tras su ingreso a los embalses de las obras de almacenamiento de cierta magnitud, hace que los gastos máximos de los hidrogramas transformados que deberán ser evacuados por las estructuras de servicio de las presas y obras asociadas, resulten en ocasiones muy inferiores a los gastos extremos de los hidrogramas de ingreso de las crecidas que se hayan establecido a partir de las indicaciones expuestas en la Norma, y como corolario, que el impacto de las mismas en los tramos de aguas abajo podrá extenderse a tiempos mucho mayores que los tiempos-base de los hidrogramas de entrada. En todos los casos, la proyección de las estructuras de servicio y las medidas estructurales y organizativas que se adopten en los tramos de evacuación, deberán responder a los resultados del cálculo de los hidrogramas transformados, que deberá llevarse a cabo con la mayor precisión, sin emplear simplificaciones extremas como las que se basan en la adopción de hidrogramas triangulares, en la denominada fórmula de Kocherin o en otros métodos similares de muy limitado alcance. Se exceptúa de la disposición anterior, exclusivamente, el tratamiento de las obras de derivación que se caractericen por espejos de agua de muy poca extensión, y si se evidencia *a priori* (y se confirma por cálculo), que el fenómeno de laminado y transformación de las crecidas no conducirá en las mismas a ninguna modificación apreciable de los hidrogramas.

8.9 Al mismo tiempo, las coronaciones de las presas y obras asociadas, y las medidas para su protección contra el oleaje, se proyectarán a partir de los niveles que alcanzará el agua en los instantes de evacuación de los gastos máximos transformados de las crecidas establecidas en cada caso para la situación de diseño y para las situaciones de comprobación, siguiendo las especificaciones de la NC 974: 2013 Presa — Protección contra oleaje.

8.10 Por otra parte, en atención al peso que les corresponda en la evacuación de las crecidas de distintas magnitudes, los aliviaderos se clasifican en:

- *aliviaderos principales*, que en general responden por sí solos, por lo menos, por la evacuación íntegra de las crecidas con probabilidades de diseño y de comprobación;
- *aliviaderos auxiliares*, que en determinados casos se construyen para compartir con los aliviaderos principales, la evacuación de las crecidas con probabilidades de diseño, y sobre todo de comprobación, así como de otras que tengan menor probabilidad de ocurrencia; y
- *aliviaderos de emergencia o de reserva*, que eventualmente pueden construirse para contribuir a la evacuación de las crecidas de comprobación, así como de aquellas que con carácter extraordinario, puedan superar en magnitud a estas últimas.

Tomando esto en cuenta, se estipula que al analizar los procesos de transformación que tendrán lugar en los embalses, y en general en los tramos de aguas arriba de las obras de almacenamiento o de derivación, se considerará que en la evacuación de las crecidas de diseño participarán únicamente los aliviaderos principales y auxiliares, pero que en el análisis de los demás casos deberá suponerse que junto a estos últimos, y a los aliviaderos de emergencia con que

eventualmente cuente la presa, participará también toda otra estructura de servicio, obra de conducción y orificio de descarga que se pueda aprovechar al efecto. Por último, cuando se trate de un aliviadero regulable con compuertas, a los análisis se incorporará otro caso de comprobación, que se tratará bajo los mismos principios de los casos de comprobación habituales, pero en el que se supondrá, adicionalmente, que una de las compuertas no podrá ser utilizada, y permanecerá cerrada durante todo el tiempo que dure la evacuación de la crecida.

8.11 Si los cálculos de transformación de los hidrogramas de las crecidas arrojan que los picos de los hidrogramas transformados serán de muy corta duración, se podrá aceptar que como resultado del paso de las crecidas tengan lugar:

- alteraciones en el régimen normal de funcionamiento de las obras de toma, siempre y cuando ello no comporte la destrucción de las mismas;
- daños en los aliviaderos de emergencia, que no influyan en la seguridad de las estructuras de servicio principales;
- variaciones en el régimen de descarga de los conductos, que no provoquen la destrucción de los mismos;
- socavaciones en el cauce y en las márgenes del río aguas abajo de la obra, si ellas no llegan a constituir una amenaza para la seguridad de las estructuras de servicio principales ni provocar afectaciones a obras industriales o a poblaciones, y si las consecuencias de dichas socavaciones pueden ser eliminadas tras el paso de las crecidas.

8.12 Las cargas e influencias que se generen durante las situaciones de comprobación deberán considerarse en las combinaciones extraordinarias de cargas que generalmente se adoptan como parte de la proyección estructural de las obras hidráulicas.

8.13 En los ríos donde existan o se proyecten obras en cascada, el gasto máximo transformado de evacuación por cada obra se determinará considerando la categoría de esta última, su ubicación en la cascada, la capacidad de paso del agua a través de las obras que estén situadas aguas arriba de la misma, y las características de explotación de dichas obras. Al llevar a cabo los cálculos de transformación de los hidrogramas de las crecidas, no se supondrá ninguna eventual rotura de alguna de las obras situadas aguas arriba, salvo que existan consideraciones excepcionales que obliguen a ello, en cuyo caso se requerirá la aprobación de la instancia máxima del organismo a cargo de la proyección hidráulica de la obra, u obras en cuestión.

8.14 Con independencia de las categorías de proyección de las obras que constituyan una cascada, el paso de la crecida de diseño por cada una de ellas no deberá provocar afectaciones en las que queden situadas aguas abajo de la misma.

8.15 De igual modo, con independencia de las categorías de proyección de las obras que formen parte de un trasvase, el paso de la crecida de diseño por cada una de ellas no deberá provocar afectaciones en las de aguas abajo, ni en las que dependan de su funcionamiento.

8.16 Durante los períodos de construcción, las obras hidráulicas permanentes principales están expuestas al riesgo de superación de los gastos extremos de las crecidas, por lo que se requiere garantizar su seguridad, en función de las etapas constructivas y de los plazos de construcción. Las probabilidades de que dichos gastos extremos se vean superados durante los períodos de construcción, se establecen por la Tabla 5. Para aplicar dicha tabla, se considerará una probabilidad variable de superación de los gastos extremos, en la medida en que el tiempo transcurra. En los períodos de construcción no se considerará ninguna combinación extraordinaria

de cargas para proceder a la proyección estructural.

8.17 En los períodos de construcción debe considerarse también la posibilidad de que durante el paso de las crecidas, se provoque una sobreelevación de las aguas, ocasionada por la obstrucción o tupición de las estructuras de servicio.

8.18 Si una obra hidráulica comprendida en las categorías I a III, se destina a entrar en explotación aún antes de que termine su construcción, la probabilidad de superación de los gastos extremos de las crecidas se establecerá adoptando una categoría o subcategoría provisional, por las Tablas 3 y 4 y las indicaciones que las acompañan, en dependencia de la altura que alcanzará la obra en el momento de la puesta en explotación, y de las consecuencias que pueda acarrear su eventual destrucción, pero que no sea superior a la que se obtenga a partir de la Tabla 6. Al hacer esto no se considerará ninguna situación de comprobación.

Tabla 5 — Probabilidades p (en %) de superación de los gastos extremos de las crecidas, durante los períodos de construcción de las obras permanentes principales

Intervalo de tiempo	Categoría de la obra	
	I, II	III, IV, V
hasta un período seco	10 % (período seco)	10 % (período seco)
entre 6 meses y 1 año	5 %	10 %
entre 1 y 2 años	1 %	3 %
más de 2 años	0,5 %	1 %

Tabla 6 — Probabilidades p (en %) de superación de los gastos extremos de las crecidas, durante los períodos de explotación temporal de las obras permanentes principales

Duración del periodo de explotación temporal	Categoría de la obra	
	I	II, III
1 año	1,0 %	3,0 %
2 años	0,5 %	3,0 %
3 años	0,3 %	3,0 %
5 años	0,2 %	2,0 %
10 años	0,1 %	1,0 %

Las Tablas 5 y 6 deben diferenciarse entre sí. La Tabla 5 se refiere a las obras permanentes principales durante los períodos de construcción, sin considerar la explotación temporal de las mismas, mientras que la Tabla 6 se basa en que las obras ya hayan iniciado su explotación.

8.19 Las obras hidráulicas temporales se proyectarán con probabilidades de superación de los gastos extremos de las crecidas, que dependerán del período de tiempo durante el cual protegerán a las obras permanentes. Las probabilidades de superación de los gastos extremos de las crecidas correspondientes a las situaciones de diseño, se obtienen de la Tabla 7. Para proyectar las obras hidráulicas temporales no se considerarán situaciones de comprobación.

Tabla 7 — Probabilidades p (en %) de superación de los gastos extremos de las crecidas, durante los períodos de funcionamiento de las obras hidráulicas temporales

Tiempo de funcionamiento	Probabilidad p
1 período seco	10 % (período seco)
entre 6 meses y 1 año	10 %
entre 1 y 2 años	5 %
más de 2 años	3 %

8.20 Al proyectar pequeñas centrales hidroeléctricas cuyas instalaciones no formen parte de obras permanentes principales, las crecidas extremas se establecerán únicamente con las probabilidades de superación correspondientes a las situaciones de diseño. Si una pequeña central hidroeléctrica no forma parte de un nudo hidroenergético fundamental, se podrá admitir la interrupción de su funcionamiento durante el paso de las crecidas.

8.21 Los canales de drenaje de III categoría se proyectarán con una probabilidad de superación de los gastos máximos de 5 %, y los canales de IV categoría con una probabilidad de 10 %. Con una argumentación adecuada y la aprobación previa del Consejo Técnico del Proyecto, estas probabilidades de proyección de las obras de drenaje se podrán reducir si la destrucción de las mismas pudiera provocar graves daños a la economía nacional, o poner en peligro a seres humanos o a instalaciones vitales para la economía nacional.

9 Los impactos del cambio climático, y el rediseño o remodelación de las presas y obras asociadas

9.1 En el apartado 1 se declaró, como parte del objeto de la Norma, que la misma deberá ser aplicada, tanto a la proyección de nuevas presas y obras asociadas, como a la revisión o el rediseño de las ya existentes, cuando se dictamine la necesidad de proceder a su remodelación. En el escenario actual, la eventual modificación de las obras aparece sobre todo como consecuencia de las alteraciones que se producen a nivel mundial a causa del cambio climático, y que tienen lugar también en nuestro territorio.

En particular, dos manifestaciones del cambio climático en el comportamiento hidrometeorológico del archipiélago cubano pueden identificarse como las principales amenazas para el normal funcionamiento, e incluso para la preservación misma de la integridad de las presas: las modificaciones que experimentan las precipitaciones y el incremento de la actividad ciclónica.

9.2 En efecto, las variaciones temporales y espaciales de las precipitaciones, y los acrecentamientos locales en volumen e intensidad que se observan cada vez con más frecuencia en procesos convectivos, o acompañando a vaguadas, hondonadas y otras formaciones tropicales, incluidos los propios huracanes, son factores que se unen a otros elementos, algunos de origen antrópico, y que han ido alterando cada vez más las respuestas hidrológicas de nuestras cuencas. Esto sirvió como punto de partida para sustentar desde el año 1998, la hipótesis de que en este nuevo escenario debían preverse mayores gastos picos en las grandes crecidas, y mayores volúmenes del agua transportada por ellas, y alertar sobre la necesidad de adoptar las medidas necesarias. Las investigaciones iniciadas en ese mismo año, y la plasmación práctica y enriquecimiento de sus resultados durante la ejecución, a partir del año 2006, de un Programa orientado a esos fines, han corroborado consistentemente dicha predicción, al evidenciar que en efecto, como regla, los valores actuales de cálculo de estos dos parámetros esenciales de las crecidas, superan ya considerablemente a los que se determinaron en los años en que se llevaron a cabo los proyectos de un gran número de presas, y por lo tanto, que en muchos casos los gastos máximos transformados, y las cargas máximas de vertimiento asociadas a las crecidas de diseño y de comprobación, sobrepasarán en valor a los que se adoptaron para dimensionar y construir los aliviaderos de la mayoría de dichas presas.

Para ejemplificar lo anterior, en la Tabla 8 se han resumido algunos de los resultados obtenidos al respecto durante la aplicación del mencionado Programa al conjunto de presas de las anteriores provincias de La Habana y Ciudad de La Habana, con la única excepción de la presa Ejército Rebelde.

Tabla 8 — Parámetros de las crecidas naturales y de las crecidas transformadas en 20 presas, según los proyectos originales, y según los estudios de actualización (p en por ciento, Q_{pico} y Q_{max} en m^3/s , V_{ave} en hm^3 , H_{max} en m)

A. Parámetros de las crecidas naturales

Presa	Año	Valores del proyecto			Valores actualizados			diferencia en %	
		p %	Q_{pico} m^3/s	V_{ave} hm^3	p %	Q_{pico} m^3/s	V_{ave} hm^3	Q_{pico} m^3/s	V_{ave} hm^3
Bacuranao	1971	0,5	465	8,78	1,0	430	10,688	-7,5	+21,7
La Coca	1968	0,5	525	6,26	1,0	351	8,666	-33,1	+38,4
La Zarza	1971	0,5	566	8,42	1,0	470	11,524	-17,0	+36,9
Niña Bonita	1970	1,0	147	1,99	1,0	148	2,606	+0,7	+31,0
Caunavaco	1990	0,1	510	10,36	0,5	472	11,217	-7,5	+8,3
Mosquito	1963	0,5	304	3,94	1,0	287	7,063	-5,6	+79,3
La Ruda	1978	0,5	250	2,92	1,0	237	2,806	-5,2	-3,9
Aguas Claras	1976	1,0	320	4,23	1,0	345	9,145	+7,8	+116,2
La Coronela	1977	0,5	430	7,20	1,0	412	7,406	-4,2	+2,9
San Francisco	1987	0,5	933	18,30	1,0	942	16,915	+1,0	-7,6
Pedroso	1976	1,0	1640	115,00	1,0	1705	107,04	+4,0	-6,9
Mampostón	1978	0,1	610	17,40	0,5	719	12,173	+17,9	-30,0
San Miguel	1981	0,5	410	6,20	1,0	423	6,994	+3,2	+12,8
Pinillos	1979	0,5	547	7,93	1,0	441	7,782	-19,4	-1,9
Jaruco	1980	0,5	425	6,40	1,0	518	8,491	+21,9	+32,7
Canasí	1977	0,5	740	10,80	1,0	686	12,259	-7,3	+13,5
Maurín	1973	0,5	390	6,50	1,0	616	10,850	+57,9	+66,9
Jibacoa	1973	1,0	210	3,75	1,0	379	7,126	+80,5	+90,0
Baracoa	1988	0,5	250	3,40	1,0	299	5,588	+19,6	+64,4
Lag. de Piedras	1970	1,0			5,0	159	2,095		

B. Parámetros de las crecidas transformadas

Presa	Año	Valores del proyecto			Valores actualizados			diferencia en %	
		p %	Q_{max} m^3/s	H_{max} m	p %	Q_{max} m^3/s	H_{max} m	Q_{max} m^3/s	H_{max} m
Bacuranao	1971	0,5	70	2,40	1,0	78	2,56	+11,0	+6,7
La Coca	1968	0,5	474	2,02	1,0	302	1,57	-36,3	-22,3
La Zarza	1971	0,5	444	2,10	1,0	323	1,72	-27,3	-18,1
Niña Bonita	1970	1,0	100	0,73	1,0	104	0,73	+4,0	0,0
Caunavaco	1990	0,1	49	1,20	0,5	56	1,30	+14,3	+8,3
Mosquito	1963	0,5	220	1,20	1,0	271	1,37	+23,2	+14,2
La Ruda	1978	0,5	66	1,20	1,0	63	1,16	-4,5	-3,3
Aguas Claras	1976	1,0	160	1,08	1,0	279	1,61	+74,4	+49,1
La Coronela	1977	0,5	280	1,35	1,0	315	1,47	+12,5	+8,9
San Francisco	1987	0,5	129	1,93	1,0	152	2,06	+17,8	+6,7
Pedroso	1976	1,0	1640	7,00	1,0	1569	5,80	-4,3	-17,1
Mampostón	1978	0,1	428	1,80	0,5	30	0,34	-92,9	-81,1
San Miguel	1981	0,5	232	1,25	1,0	222	1,20	-4,3	-4,0
Pinillos	1979	0,5	284	1,08	1,0	237	0,99	-16,5	-8,3
Jaruco	1980	0,5	210	1,20	1,0	219	1,31	+4,3	+9,2
Canasí	1977	0,5	60	1,33	1,0	98	1,63	+62,8	+22,6
Maurín	1973	0,5	411	1,57	1,0	343	1,31	-16,5	-16,6
Jibacoa	1973		102	0,90	1,0	206	1,61	+102,0	+78,9
Baracoa	1988	0,5	243	1,14	1,0	244	1,18	+0,4	+3,5
Lag. de Piedras	1970	1,0	27	1,00	5,0	26	0,98	-3,7	-2,0

La relación incluye, en cada caso, los valores del gasto pico Q_{pico} (en m^3/s) y del volumen V_{ave} (en hm^3) de la crecida natural asumida para el proyecto, tal como fueron determinados en el año en que se proyectó la obra, así como la probabilidad estadística p (en por ciento) que se adoptó para esto, y junto a los anteriores, para su comparación, los resultados alcanzados durante estudios de actualización que se llevaron a cabo entre los años 2006 y 2008. Por su parte, en la mitad inferior de la tabla se han consignado los valores originales y los valores actualizados obtenidos en cada caso, para el gasto máximo Q_{max} (en m^3/s) de la crecida transformada por su laminación en el embalse, y para la carga máxima de vertimiento correspondiente H_{max} (en m). Por último, en el extremo derecho de cada sección de la tabla, se han calculado las diferencias porcentuales de los valores actualizados, con respecto a los valores originales de estos cuatro parámetros.

En 10 de estas 20 presas los gastos picos actuales de diseño superan a los originales en una proporción que llega a ser de 18 % a 22 % en Mampostón, Baracoa y Jaruco, y que se eleva hasta 58 % y 81 % en Maurín y Jibacoa, respectivamente, mientras que en 14 de las 20 presas los volúmenes actuales de las crecidas de diseño son mayores que los originales, con incrementos que llegan a ser tan altos como 79 %, 90 % y 116 % en Mosquito, Jibacoa y Aguas Claras.

La significación de estas alteraciones se acentúa mucho más, por el importante hecho de que los valores actualizados de Q_{pico} y V_{ave} fueron determinados con las probabilidades contempladas en la regulación vigente desde el año 1990 y hasta la promulgación de la presente Norma (Regulación de Proyectos No. 001/90 Categoría de las obras hidrotécnicas y probabilidad de superación de los gastos máximos, Unión de Empresas de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos, La Habana), según la cual se debían emplear probabilidades de 0,5 %, 1 % ó 5 % en las presas con categorías respectivas de proyección iguales a II (como en Caunavaco y Mampostón), III o IV (como en Laguna de Piedras), mientras que por el contrario, como se observa en la tabla, prácticamente en todos los casos las probabilidades que se adoptaron en los proyectos originales fueron de un grado mayor, como se estipulaba en aquel entonces, a saber, de 0,1 %, 0,5 % y 1,0 % para esas mismas categorías. Como las diferencias de signo negativo que aparecen en la tabla responden a razones de otra índole, que se explican fácilmente y que aparecen detalladas en los respectivos informes de actualización, se puede afirmar, sin lugar a dudas, que de mantener las probabilidades originales, casi en la totalidad de las 20 presas las diferencias porcentuales no sólo resultarían de signo positivo, sino que alcanzarían valores mucho mayores que los que se muestran en la tabla. En otras palabras, esta muestra representativa evidencia que el cambio climático viene elevando los parámetros de las grandes crecidas, y comprometiendo de este modo el papel laminador de los embalses y el funcionamiento de los aliviaderos, para garantizar la apropiada evacuación de aquéllas.

Esto último se observa con nitidez en las dos columnas finales de la segunda sección de la tabla, donde se han calculado también las desviaciones porcentuales entre los valores actuales y los valores originales de los gastos máximos transformados Q_{max} , y de las correspondientes cargas máximas de vertimiento H_{max} . A pesar de la sustancial diferencia existente entre las probabilidades empleadas en los proyectos originales, y en la actualidad, en 12 de los 20 casos los gastos transformados son ahora mayores, en por cientos que llegan a ser de 74 % y 102 % en Aguas Claras y Jibacoa, mientras que 10 de las 20 presas se caracterizan actualmente por mayores cargas máximas de vertimiento por sus aliviaderos, con diferencias porcentuales que llegan a ser de 23 %, 49 % y 79 % en Canasí, Aguas Claras y Jibacoa, donde se crean elevaciones adicionales de 0,30 m, 0,53 m y 0,71 m en los niveles NAM de aguas máximas de los embalses.

Durante el funcionamiento de los aliviaderos, los incrementos de los gastos máximos transformados y de las cargas de vertimiento correspondientes, dificultan considerablemente la evacuación segura de las crecidas de gran magnitud, una circunstancia que cobra especial relevancia a la luz de lo establecido por el Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD), que tal como se expuso en 8.2, ha puesto de relieve la insuficiente capacidad de servicio de los aliviaderos, como la causa fundamental de la tercera parte de las destrucciones de presas. En las ya mencionadas investigaciones y estudios específicos de actualización, se logró identificar y sustentar las medidas de actualización de las presas de tierra que se muestran más eficaces para solucionar el problema, en cada caso. Ellas pueden resumirse como en la Tabla 9, que se ajusta fundamentalmente a las condiciones que prevalecen en Cuba, aunque pueden ser aplicadas también en otras latitudes. De estas alternativas, que por lo expuesto atañen fundamentalmente a los aliviaderos, seis son netamente estructurales, cinco son únicamente operacionales, y las restantes comportan acciones combinadas de los dos tipos. Los estudios referidos anteriormente han permitido caracterizar dichas medidas, y establecer los procedimientos de cálculo y las recomendaciones metodológicas necesarias para su instrumentación, mediante la deducción de las formulaciones teóricas y experimentales correspondientes, la preparación e implementación de los algoritmos, y la confección de tablas, gráficos y otros medios auxiliares que facilitan el desarrollo de los análisis y de las comparaciones, y que conducen a alcanzar los fines propuestos al menor costo.

Tabla 9 — Alternativas estructurales y operacionales, para la actualización de las presas de tierra en Cuba

NAN: nivel de aguas normales; NAM: nivel de aguas máximas;

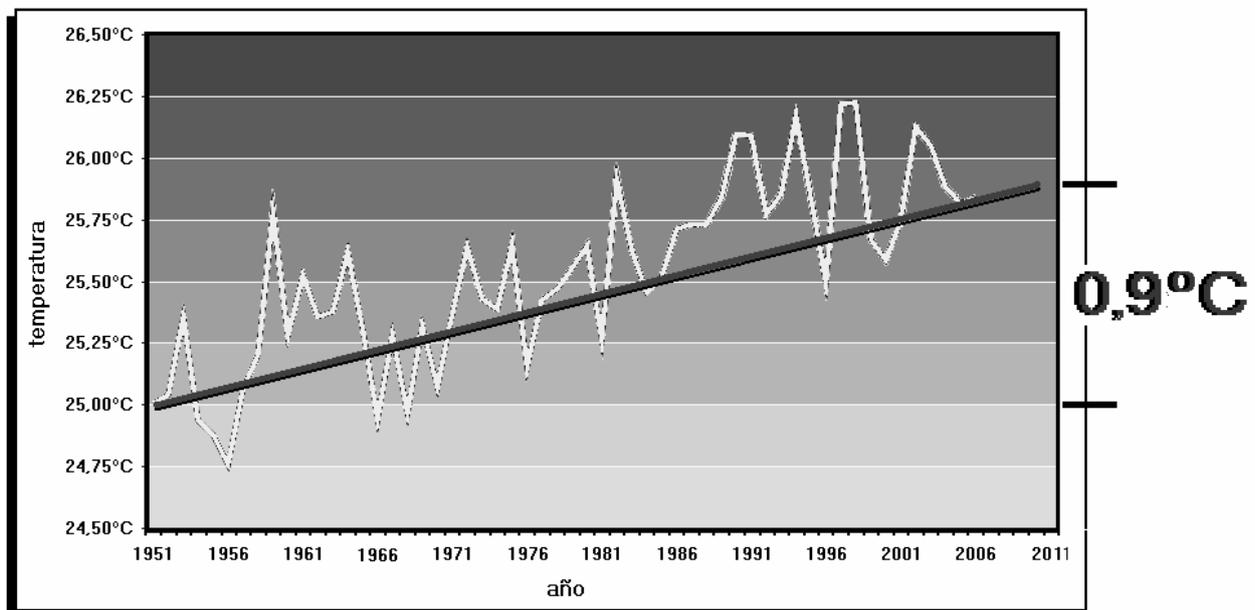
NC: nivel de comprobación probabilística; NCMP: nivel de comprobación con la Crecida Máxima Probable

1. Sustitución del perfil vertedor del aliviadero	2. Alargamiento de la cresta vertedora del aliviadero	3. Aumento del nivel NAM o de los niveles NC y NCMP, mediante la construcción o el recrecimiento de un parapeto
4. Aumento del nivel de la corona	5. Reducción del nivel NAN	6. Reducción del nivel NAN, con la incorporación simultánea de aditamentos
7. Construcción de un aliviadero suplementario de hormigón	8. Construcción de un aliviadero suplementario erosionable fusible	9. Construcción de un aliviadero suplementario con compuertas
10. Inserción de compuertas superficiales	11. Prevaciado por las compuertas de un aliviadero regulable	12. Inserción de compuertas profundas
13. Prevaciado por la obra de toma	14. Automatización del aliviadero regulable	15. Pronóstico de crecidas (PED)

9.3 Desde el punto de vista del oleaje, el aumento de los niveles NAM de aguas máximas, y por extensión, de los demás niveles de cálculo, entre los que se incluye también el correspondiente a la Crecida Máxima Probable, como segundo evento de comprobación, constituye la consecuencia más grave del problema, toda vez que reduce la altura que media entre la coronación de la presa y el agua en el embalse, y aumenta el riesgo de que las olas irruman sobre la cortina, con efectos que son progresivos y que en las presas de materiales locales, a la postre, resultan desastrosos. Ese riesgo es palpable, y se hace cada vez más frecuente y acentuado por el incremento sostenido de la actividad ciclónica, que antes se calificó como la otra amenaza del cambio climático para la seguridad de las presas en Cuba.

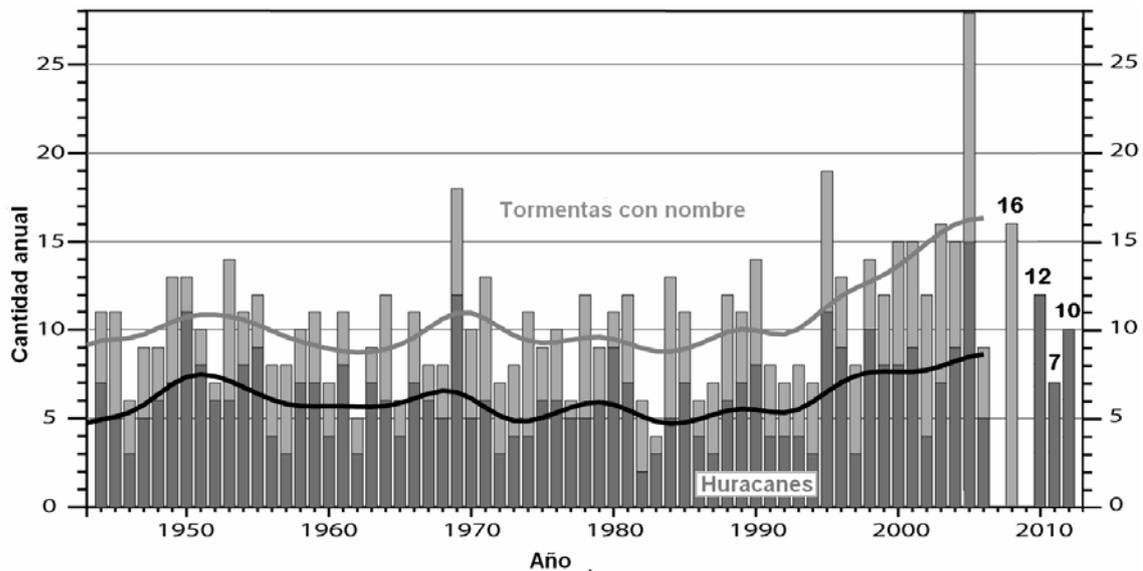
Con respecto a esto último, basta constatar en las Figuras 3a y 3b el estrecho vínculo que se establece entre el aumento sostenido de la temperatura media anual del aire sobre el archipiélago cubano, que entre los años 1951 y 2010 se ha incrementado en $0,9^{\circ}\text{C}$, como se esquematiza en la primera de estas dos figuras, y el crecimiento del número de tormentas con nombre y de huracanes, en el Atlántico Norte, en las últimas dos a tres décadas.

Estos organismos ciclónicos arrastran lluvias cada vez más copiosas, se suceden incesantemente unos a otros con inusitada violencia, aparecen no sólo en las denominadas temporadas ciclónicas, como el Wilma, con su típica recurva de octubre del 2005, sino también en meses históricamente calmos o poco activos, como el Gustav, cuyas rachas del 31 de agosto de 2008 llegaron a 340 km/h en Pinar del Río para constituir un record mundial, y transgreden incluso las leyes de la teoría de las probabilidades, al seguir los pasos del evento anterior a lo largo de trayectorias muy cercanas entre sí, como ocurrió con este último ciclón y con el Ike, que le siguió en el mes de septiembre de ese propio año, y que azotó de forma casi idéntica el extremo occidental de esa misma provincia, en ambos casos con descensos de la presión atmosférica que se situaron entre los mayores, en los registros históricos de estos fenómenos.



Variación de la temperatura media anual de Cuba entre los años 1951 y 2010 (Fuente: Instituto de Meteorología)

Figura 3a



TORMENTAS CON NOMBRE Y HURACANES DEL ATLANTICO NORTE (Fuente: Dr. Ramón Pérez)

Figura 3b

Al reconocer a los ciclones como la principal fuente de los vientos en los embalses de nuestro país, y proceder a caracterizar su decisivo rol en la formación de las olas en los embalses, la Norma NC 972: 2013 Presa — protección contra oleaje, que como se especificó en el Capítulo 2 se debe emplear durante la aplicación de la presente Norma, se desmarca resueltamente de la anterior, donde este fundamental aspecto se trataba con una visión heredada de análisis propios de los países continentales, que además fueron simplificados en su formulación. A contrapelo de lo que en ocasiones se esgrime erróneamente, el hecho de que hasta el momento no hayan sido demasiado frecuentes las afectaciones provocadas por el oleaje en nuestras presas, como las que ocasionó, sin embargo, por citar sólo un ejemplo, el Katrina de agosto del 2005, al dislocar y desplazar una gran cantidad de rocas del talud de la presa Pinillos, no valida en modo alguno los resultados que se alcanzaron con dichos análisis, por cuanto desde el punto de vista probabilístico, incluso las tres a cinco décadas que han transcurrido desde la puesta en explotación de las 120 presas construidas a partir de 1959 y antes de 1980, no sobrepasan por su extensión la mitad, ni aún la cuarta parte, de los períodos de retorno de 100 años o de 200 años equivalentes a las probabilidades de 1 % o de 0,5 % que, como se desprende de la Tabla 8, se adoptaron para proyectar la mayoría de ellas.

9.4 La sistematización de las experiencias parciales alcanzadas con la actualización de las 20 presas de la Tabla 8, y también de otras presas, muestra que la incorporación adicional de un *aliviadero suplementario fusible* constituye, en numerosas ocasiones, una alternativa idónea para compensar el déficit de capacidad de servicio de un aliviadero, o de un sistema de aliviaderos, ya construido, y que la adición de un *parapeto* a la corona de una presa en explotación (o el recrecimiento de uno ya existente), representa también, con mucha frecuencia, una vía segura para garantizar la protección de esta última contra el oleaje, por lo que ambas soluciones de carácter estructural, que ya se ha logrado caracterizar exhaustivamente, y que en uno y otro caso requieren mínimas inversiones, deben figurar como alternativas obligadas en las comparaciones técnico económicas que se lleven a cabo en cada proyecto de actualización y rediseño de una presa. Al mismo tiempo, las medidas de prevaciado, con la consecuente confección de los *Gráficos de Prevaciado*, y el pronóstico de crecidas, con la aplicación del novedoso *Pronóstico*

Endógeno Dinámico originado por las referidas investigaciones, constituyen opciones operacionales de fácil realización, que por sí solas o combinadas entre sí o con soluciones de carácter estructural, se instrumentan de forma inmediata con el solo empleo de las miras ya instaladas en los embalses, no requieren equipamiento adicional ni inversión alguna, y con una implementación apropiada son capaces, como las dos alternativas estructurales destacadas anteriormente, y las que en general figuran en la Tabla 8, de garantizar la seguridad de las obras y de sus entornos, en los nuevos y complejos escenarios de cambio climático, aplicando en los casos necesarios, con la premura que imponen estas circunstancias, las medidas de mitigación y las modificaciones estructurales correctivas que se desprendan del cumplimiento de la presente Norma.

Anexo A
(informativo)

Aspectos ilustrativos de un estudio de caso

La Tabla A.1 resume los gastos extremos y los volúmenes de las crecidas correspondientes a distintas probabilidades en el cierre de la presa Mayarí, según un estudio hidrológico actualizado del año 2005, destinado a la proyección de dicha presa.

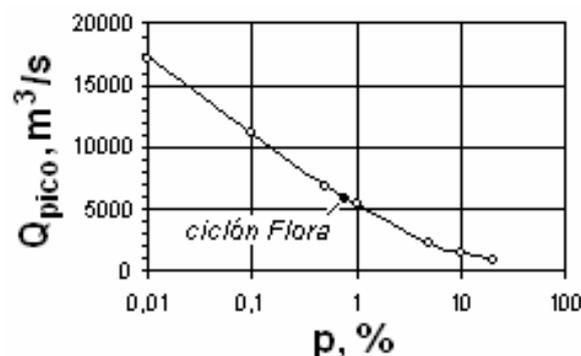
Tabla A.1 — Gastos extremos y volúmenes de crecidas de diferentes probabilidades, en el cierre de la presa Mayarí, provincia de Holguín

Probabilidad p %	0,01	0,1	0,5	1	5	10	10 (ps)	20	Flora
Gasto extremo Q_{pico} m^3/s	17330	11080	6945	5300	2220	1435	310	900	5900
Volumen V_{ave} hm^3	642	454	322	265	140	100	33	71	1189

NOTA (ps) - período seco.

La Regulación de Proyecto 001/90 estableció probabilidades de diseño y comprobación de 0,5 % y 0,1 % para la proyección de esta presa de almacenamiento y protección contra inundaciones, de categoría II. Los hidrogramas de las crecidas caracterizadas por estas probabilidades se obtuvieron a partir del hidrograma registrado el 30 de octubre de 1966, con un gasto pico de 1955 m^3/s y un volumen de 65 hm^3 , que se tomó como “modelo”, y al que se aplicaron coeficientes de paso correspondientes a distintas probabilidades de cálculo. Sin embargo, la crecida más intensa reportada ocurrió en realidad en octubre del año 1963, durante el paso del ciclón Flora, en cuya ocasión, como se indica también en la tabla, el río Mayarí condujo un gasto máximo de 5900 m^3/s .

La Figura A.1 muestra que este gasto corresponde formalmente a una probabilidad cercana a 0,75 %, y que será superado en 18 % por el de 6945 m^3/s de la crecida de diseño de 0,5%, y en 88 % por los 11080 m^3/s de la crecida de comprobación de 0,1 %.



PRESA MAYARÍ
RELACIÓN Q_{pico} vs. p

Figura A.1

Sin embargo, el complejo comportamiento del hidrograma de dicha crecida, que fue reconstruido hasta cubrir ocho días completos y que resultó compuesto por tres picos consecutivos de 4450, 5900 y 4410 m³/s, hizo evidente que por sus implicaciones, la misma debía jugar un rol similar al de la crecida de comprobación probabilística de 0,1 %, y que las estructuras de servicio de la presa debían garantizar que la obra fuera capaz de enfrentar con éxito la repetición de un evento similar al de este caso extremo, que por lo expuesto anteriormente puede conceptuarse categóricamente como la Crecida Máxima Probable, en este escenario hidrológico.

Entre las alternativas de proyección de esta obra, se estudiaron la de un único aliviadero automático en la cota NAN de aguas normales de 85,00 msnm, con umbral ancho de 20 m de cresta, y la de un sistema compuesto por el anterior y por un aliviadero auxiliar del tipo fusible, con la base en la cota 91,4 msnm, que como se muestra en el esquema muy simplificado de la Figura A.2, se concibió dividido por muretes en doce secciones de 20 m cada una, que en grupos de a cuatro presentaban tres alturas diferentes de 2,6, 2,8 y 3,0 m, y se destinaban a quedar destruidas consecutivamente, en dependencia de la magnitud de la crecida a evacuar. Los gráficos de las Figuras A.3, A.4, A.5 y A.6 contienen los hidrogramas de 1 % de probabilidad, de diseño y de comprobación probabilística de 0,5% y 0,1%, así como el hidrograma compuesto de la crecida originada en el cierre por el ciclón Flora, y junto a ellos los hidrogramas transformados generados por la presencia aislada del aliviadero automático, y por el sistema logrado con la incorporación del fusible, y los limnigramas correspondientes.

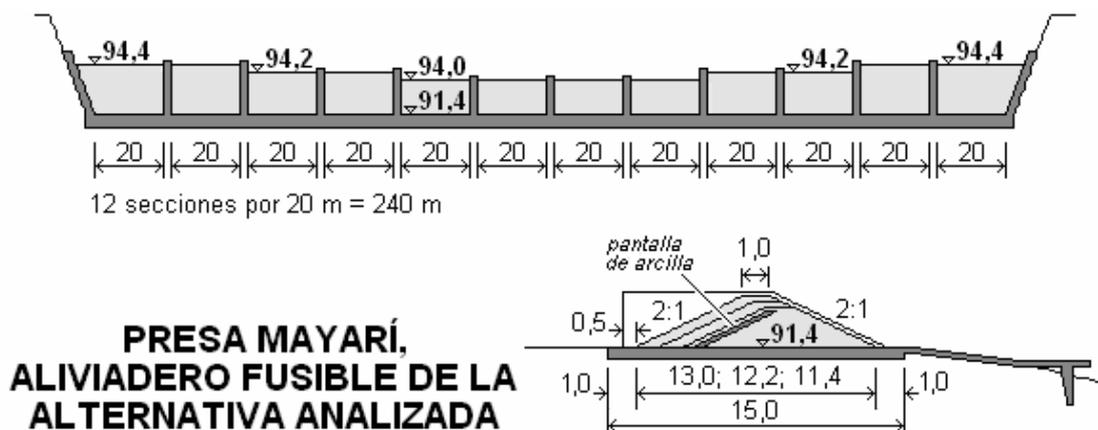


Figura A.2

La solución se destinaba a retener en el embalse la mayor parte de los volúmenes de las crecidas que ingresaran al mismo, en especial la de 1 % de probabilidad, con el fin de que el gasto transformado no generara peligros de inundación para la población de Mayarí, ubicada a poca distancia aguas abajo de la presa. Como se observa en la Figura A.3, con la alternativa en cuestión, la transformación de la crecida de 1 % de probabilidad se llevaba a cabo sin la participación del fusible, por el aliviadero principal se evacuaban 830 m³/s, y en el embalse se establecía un nivel máximo de 93,7 msnm, al que correspondía un volumen acumulado de 188 hm³. Esto significa que el gasto pico se reducía a sólo 16 % de su valor de entrada de 5300 m³/s, y que en el embalse se alcanzaba una retención tan grande como la del 71 % del volumen de la crecida, lo que satisfacía plenamente la restricción impuesta.

En cuanto al paso de la crecida de diseño, con $p=0,5$ %, en la Figura A.4 salta a la vista que la misma ocasionaba la destrucción de los dos primeros conjuntos de secciones del fusible, el establecimiento de un nivel NAM de aguas máximas de 94,37 msnm, y la evacuación de 931 m³/s

por el aliviadero principal, con lo que el gasto total evacuado resultaba igual a 2239 m³/s, es decir, al 32 % del gasto pico de 6945 m³/s. En esta situación, el volumen acumulado se elevaba a 205 hm³, 64 % del volumen de la crecida, que en este caso era de 322 hm³. Como evidencia el gráfico de dicha figura, de no construir el fusible, el gasto máximo transformado se elevaba a 1089 m³/s y el nivel NAM a 95,37 msnm, es decir, un metro por encima del anterior.

El tránsito por el embalse de la crecida de comprobación probabilística ($p=0,1$ %), que se recoge en la Figura A.5, significaba la total destrucción del fusible, la elevación del nivel en el embalse hasta la cota 95,33 msnm, y la evacuación por el aliviadero principal de 1082 m³/s. En este caso el sistema dejaba pasar un gasto total de 4064 m³/s, es decir, el 37 % del gasto pico de 11080 m³/s, y se acumulaba un volumen de 228 hm³, el 50 % del volumen de 454 hm³ de dicha crecida. Por su parte, la no incorporación del fusible al sistema, provocaba que en este caso el nivel del agua en el embalse se elevara a 99,90 msnm, 4,6 m por encima del anterior, con lo que el gasto máximo por el aliviadero era de 1910 m³/s. Como según las normas de proyección de las obras de retención, éstas deberán ser capaces de enfrentar las crecidas de comprobación sin que el agua rebase la coronación de las presas, se comprende en qué medida la construcción del fusible reducía la altura de esta presa, y abarataba su construcción. Al mismo tiempo, en cuanto a la proyección del aliviadero, las mismas normas establecen que el caso de comprobación se debe emplear, entre otros fines, para determinar la altura de los muros de la conducción, por lo que en comparación con el gasto de comprobación del sistema de ambos aliviaderos, de 1082 m³/s, el de 1910 m³/s que se alcanzaba sin el fusible suponía, sólo por este concepto, la necesidad de construir muros mucho más altos, a lo largo de una conducción de más de 200 m de longitud.

Al acometer los referidos análisis, el impacto de una crecida como la del ciclón Flora revestía un especial interés, por cuanto ese evento fue una realidad tangible que ocasionó enormes pérdidas en vidas y bienes materiales (ver la Tabla 4A del texto principal de la Norma). Los cálculos se basaron en el hidrograma reconstruido de la crecida, que se muestra en el gráfico de la Figura A.6. Aunque el gasto pico de 5900 m³/s de este hidrograma es sólo ligeramente mayor que el de 5300 m³/s que caracterizaba al de probabilidad 1 % obtenido con el modelo del 30/10/66, dicho pico estuvo, sin embargo, acompañado de otros dos picos, uno anterior de 4450 m³/s y otro posterior de 4410 m³/s, separados del principal por intervalos de 43 y 12 horas, respectivamente. Como es conocido, con cualquier aliviadero o sistema de aliviaderos, resulta especialmente difícil enfrentar la transformación de las crecidas que presenten más de un pico. En efecto, cuando como consecuencia del primero, ya se ha alcanzado un nivel extremo del agua en el embalse, y el sistema se encuentra descargando el volumen que se almacenó en el mismo, la obra se enfrenta al ingreso de un nuevo volumen transportado por un segundo pico, lo que frena la disminución de los niveles, y puede revertir el proceso y provocar un nuevo ascenso de estos últimos, hasta alcanzar un nuevo extremo, que será menor o mayor que el primero, en dependencia de las relaciones que se establezcan entre los factores que intervengan en la transformación. El fenómeno se repetirá tantas veces como picos presente el hidrograma de entrada, y conducirá generalmente a un hidrograma de salida con forma de “meseta”, que se caracterizará por valores especialmente altos del gasto máximo y del nivel máximo correspondiente.

En el caso que se analiza, esta peculiaridad condujo a que la evacuación de una crecida como la del ciclón Flora por el sistema de aliviaderos, se caracterizara por la formación de tres picos consecutivos, con gastos totales muy similares entre sí, de 3266 m³/s, 3893 m³/s y 3731 m³/s, que provocaban en el embalse niveles extremos de 94,69 msnm, 95,20 msnm y 95,07 msnm, de los cuales el tercero ocurría a las 46,5 horas de producirse el primero. De estos picos, el aliviadero principal respondía por la evacuación de gastos máximos de 980 m³/s, 1061 m³/s y 1040 m³/s, mientras que el aliviadero fusible daba paso a 2286 m³/s, 2832 m³/s y 2691 m³/s, y funcionaba en

total 6,4 días, desde la ruptura de las primeras secciones, hasta que el descenso del nivel del agua alcanzaba finalmente la cota 91,4 msnm de la base de hormigón sobre la que se levantaban las mismas. Durante la evacuación de la crecida, se acumulaba un volumen máximo de 225 hm³, que representaba el 18,9 % del volumen de 1189 hm³, este último determinado a partir de las coordenadas del hidrograma.

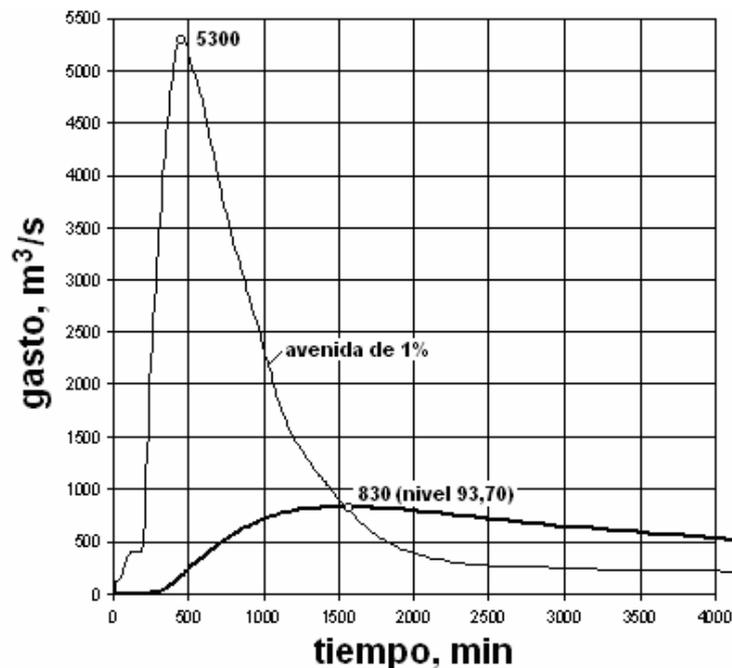
Como se observa, los valores máximos 3893 m³/s y 95,20 msnm del gasto y del nivel del agua resultaban muy cercanos a los máximos 4064 m³/s y 95,33 msnm que se producían con la evacuación de la crecida de comprobación probabilística de 0,1 %, y esto permite afirmar, primero, que a los efectos de la presente proyección, la crecida del ciclón Flora pasaba a desempeñar, como ya se había previsto, un papel similar al de dicha crecida de comprobación, lo que se avalaba adicionalmente por la importante circunstancia, de que la crecida provocada por este ciclón había ocurrido realmente, y segundo, que con esta alternativa la obra podía enfrentar con éxito el arribo de una crecida con características tan extremas como las que identificaron el azote de este último. Hay que subrayar que esto ocurría gracias a la incorporación del aliviadero fusible, cuyas secciones se destruían en un término de 1,4 horas a partir de 23,3 horas de iniciada la crecida, dando como resultado que a partir de ese momento, la capacidad de paso del sistema crecía abruptamente, se podía enfrentar la evacuación de nuevos volúmenes con incrementos relativamente pequeños del nivel, y se neutralizaba muy eficazmente la tendencia al ascenso intenso de este último. Esto se evidencia con los gráficos de la Figura A.6, los cuales muestran que sin la participación del fusible, el pico intermedio se reducía a una mera inflexión, el primero era poco marcado, con un gasto de 1578 m³/s y un nivel de 98,17 msnm, pero el último llegaba a valores tan extremos como 3158 m³/s y 105,60 msnm, es decir, a un gasto máximo que casi triplicaba el valor 1082 m³/s de la crecida de comprobación del sistema, y a un nivel que superaba en 10,27 m el nivel máximo 95,33 msnm de dicha crecida. Por lo que ya se expuso, esto implicaba un aumento de mucha consideración en la altura de los muros, y un incremento de no menos de 8 m en la altura de la cortina de la presa, para evitar que el agua la rebasara y provocara su destrucción. Más aún, como en este caso ante el aliviadero principal se formaba una carga de vertimiento de 20,60 m, que en la práctica resulta inadmisibles para una obra con estas características, se puede afirmar que, de hecho, la no inclusión del fusible en el proyecto en cuestión, lo inhabilitaba para dejar pasar una crecida tan real como fue la del Flora, obligando a reformular radicalmente la concepción del mismo y conduciendo finalmente a otra solución más costosa, que entre muchos otros aspectos requería la construcción de una cortina considerablemente más alta que la correspondiente a esta alternativa.

De vuelta a los resultados alcanzados con el análisis de la crecida de diseño, hay que constatar que una reducción en el nivel máximo similar a la que se lograba con el fusible (y el consecuente incremento en el gasto máximo), se podía alcanzar también, por ejemplo, construyendo el aliviadero con una longitud de vertimiento mayor, o sustituyendo su umbral ancho por un perfil vertedor más eficiente. Sin embargo, en uno y otro caso, las consecuencias de la modificación se habrían extendido también a la transformación de la crecida de 1 % de probabilidad, y provocado que por el aliviadero se entregara un gasto muy superior a los 830 m³/s de la solución con fusible, contrariando una de las restricciones impuestas a esta obra y provocando, por lo tanto, inundaciones en la población de Mayarí.

Por otra parte, en la Figura A.4 se observa también que con la alternativa analizada, el crecimiento del nivel del agua en el embalse al paso de esa crecida de diseño se detenía en la cota 94,37 msnm, a sólo 0,03 m de la corona del último grupo de secciones del fusible, que se localizaba en la cota 94,4 msnm. Cualquier imprecisión en los datos de entrada, y en los cálculos realizados, habría bastado para borrar esta diferencia, y ello significa que a los efectos prácticos,

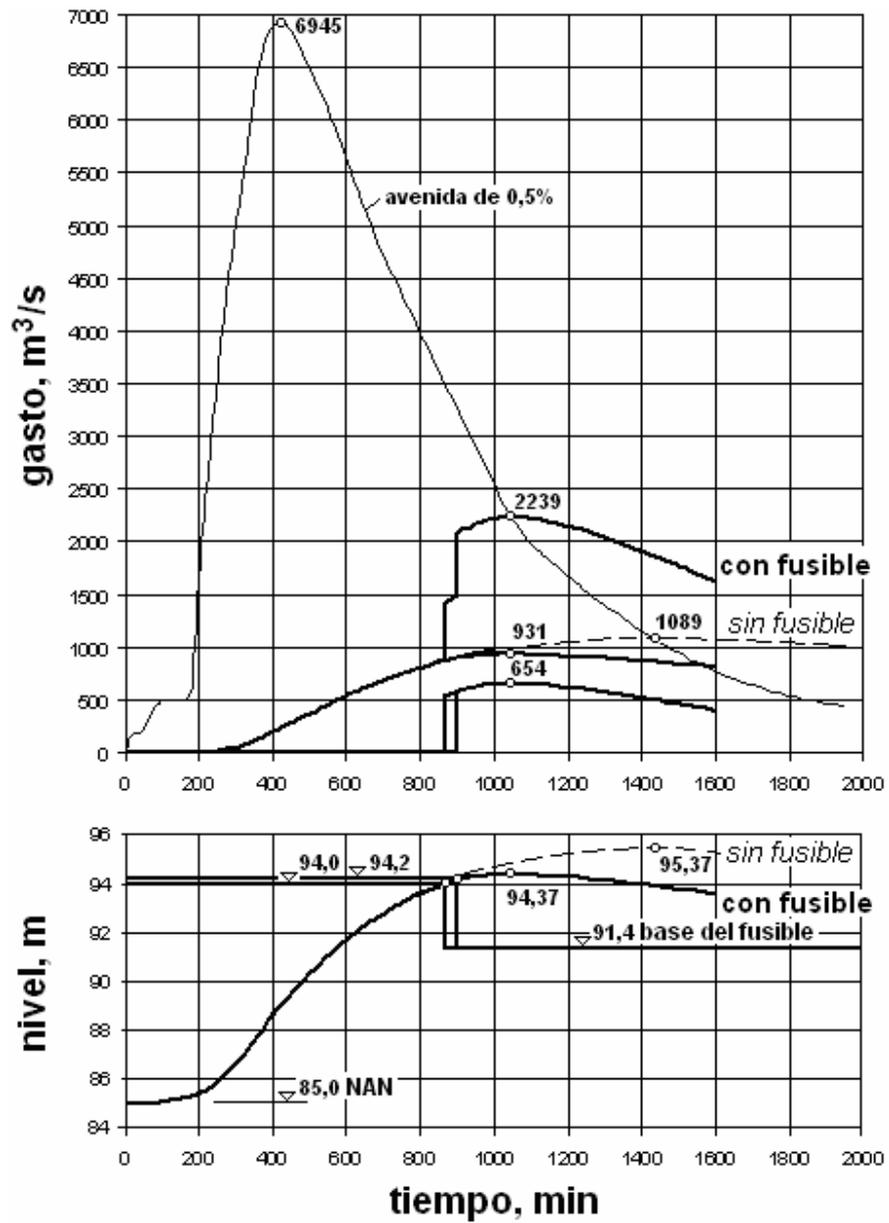
se podía considerar que con la ocurrencia de esta crecida, era muy probable que el último conjunto de secciones, de 3 m de altura, quedara también destruido. Esto conduce a la importante conclusión de que la construcción de estas últimas secciones del fusible brindaba la garantía absoluta de que, al margen de las inevitables imprecisiones contenidas en estos resultados, y sin que importara cuáles fueran los que se cometerían durante la construcción del sistema de aliviaderos, o surgieran por deficiencias en su mantenimiento, en ningún caso el paso de la crecida de diseño provocaría que el nivel del agua en el embalse fuera superior a 94,4 msnm. Por estas razones, se podía considerar simplemente que con el paso de esta crecida, el nivel llegaría a la cota 94,4 msnm, el gasto por el aliviadero principal sería de 935 m³/s, como corresponde a ese nivel, así como que la destrucción del fusible se limitaría a los dos primeros conjuntos de secciones.

Elaboraciones posteriores llevaron a sustituir la presa original por otra con pantalla de hormigón y parapeto de muy gran altura, y unido a esto, a variar la concepción de los aliviaderos, lo que introdujo modificaciones en la concepción general del proyecto, que condujeron a desestimar la alternativa de evacuación expuesta anteriormente. No obstante, el ejemplo mostrado respalda fehacientemente la inclusión, entre las situaciones de cálculo de la Tabla 4 del texto principal de la Norma, de una segunda crecida de comprobación representada por la Crecida Máxima Probable correspondiente a la Precipitación Máxima Probable del territorio o región donde se enclave la obra en cuestión, y respalda la afirmación subrayada anteriormente, sobre la relevante importancia de tomar en consideración la posibilidad de que en el cierre de la presa que se proyecte, se generen crecidas con más de un pico.



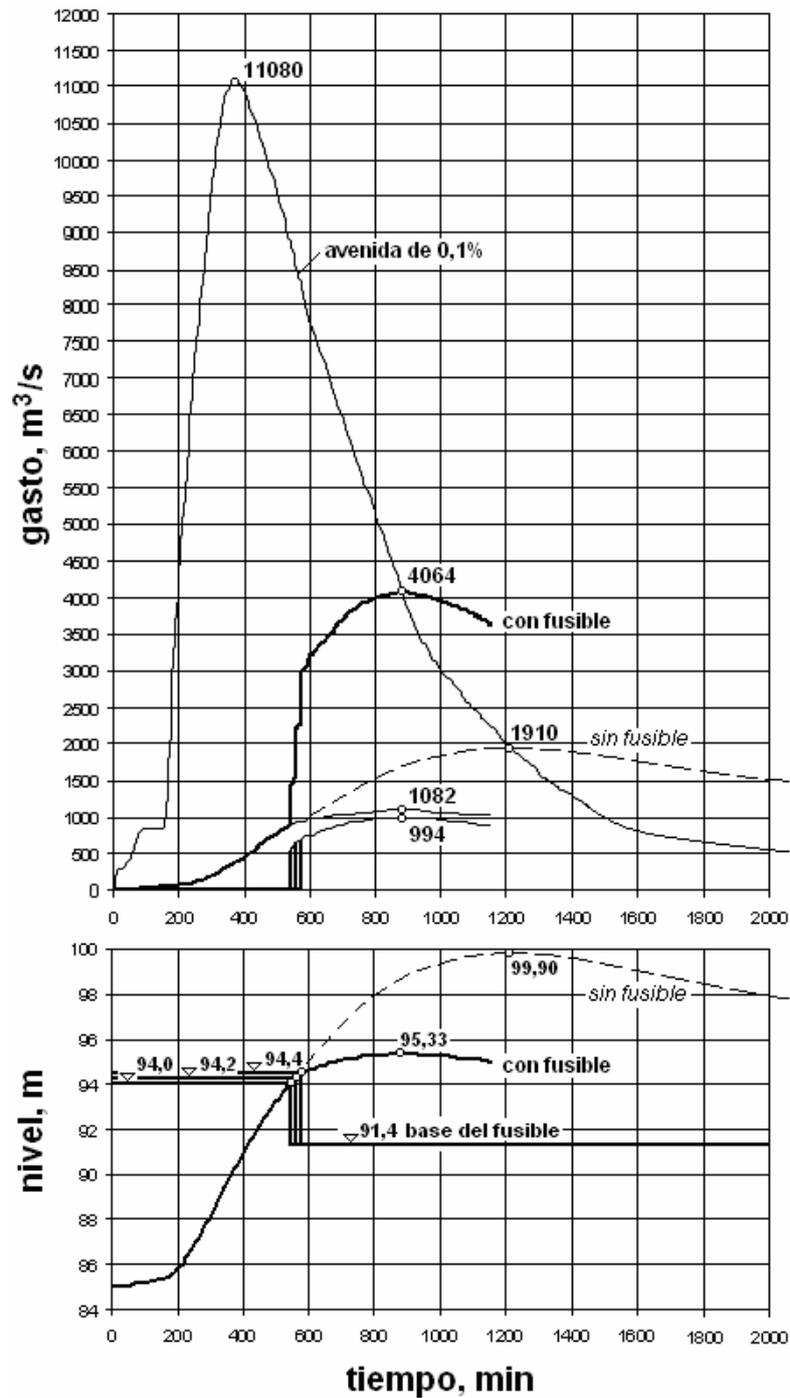
**PRESA MAYARÍ, ESTUDIO DE ALTERNATIVA.
TRANSFORMACIÓN DE LA
CRECIDA DE PROBABILIDAD $p=1\%$**

Figura A.3



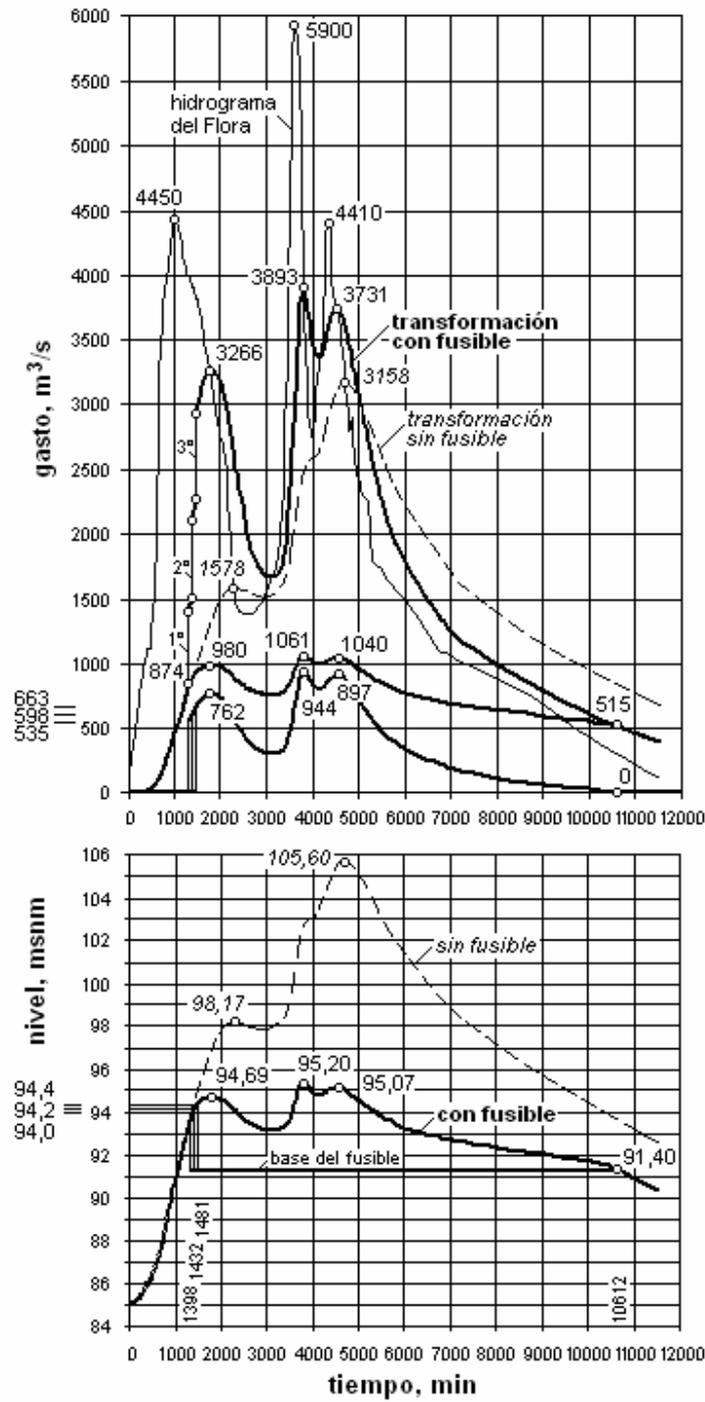
**PRESA MAYARÍ, ESTUDIO DE ALTERNATIVA.
TRANSFORMACIÓN DE LA
CRECIDA DE DISEÑO (p=0,5%)**

Figura A.4



**PRESA MAYARÍ, ESTUDIO DE ALTERNATIVA.
TRANSFORMACIÓN DE LA
CRECIDA DE COMPROBACIÓN (p=0,1%)**

Figura A.5



**PRESA MAYARÍ, ESTUDIO DE ALTERNATIVA.
TRANSFORMACIÓN DE LA
CRECIDA DEL CICLÓN FLORA**

Figura A.6

Bibliografía

- [1]. Alexeyev, G. y V. Riazanov (1973) *Cálculo del escurrimiento máximo basado en la intensidad extrema del escurrimiento y las precipitaciones*, Grupo Hidráulico Nacional del DAP, La Habana.
- [2]. Armas, R. y E. Horta (1987) *Presas de tierra*, Editorial ISPJAE, La Habana.
- [3]. Batista J (1976) *Gastos máximos en cuencas pequeñas*, Rev. "Voluntad Hidráulica", no.40, La Habana.
- [4]. Batista, J. (2008) *Peligro, vulnerabilidad y riesgo ante fenómenos hidrometeorológicos extremos*, IV Taller Uso y Cuidado del Agua, Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba y Sociedad Económica de Amigos del País, La Habana.
- [5]. Batista, J. y O. Pérez. *Precipitaciones producidas por el fenómeno meteorológico "Frederick"*, Voluntad Hidráulica, nos.52-53, pp.2-6, La Habana.
- [6]. Blind, H. (1983) *The Safety of Dams*, Water Power and Dam Construction, vol.35, no.5, may, pp.17-22.
- [7]. Camaño G., C. García y C. Dasso (2000) *Precipitación Máxima Probable de lapso variable para Córdoba, Argentina*, Memorias del XVIII Congreso Nacional del Agua, Santiago del Estero, Argentina, junio.
- [8]. Cantero, L. y E. Velazco (2010) *El Fallo de Presas de Tierra en Cuba: Una Visión sobre el Tema*, 15 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, ISPJAE, La Habana.
- [9]. Centella, A. et al. (1997) *Variaciones y cambios del clima en Cuba*, Informe Técnico, Instituto de Meteorología, La Habana.
- [10]. *Clasificación de presas en función del riesgo potencial, Guía Técnica*, Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas (Serie Monografías), Madrid.
- [11]. *Design of Small Dams* (1987) Bureau of Reclamation, 3rd. edition, Washington D.C.
- [12]. *Embalses* (2008) Programa interactivo, Dirección de Obras Hidráulicas del INRH, La Habana.
- [13]. *Engineering and Design. Flood-runoff Analysis* (1994), Engineer Manual 1110-2-1417, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000, pp.7-1 a 7-20.
- [14]. Estrada, V. (2005) *Hidrógrafos de avenidas, presa Melones*, Empresa de Investigaciones, Proyectos e Ingeniería "Raudal" de la provincia de Holguín, Holguín.
- [15]. Ferrer, F. (1993) *Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas*, CEDEX, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid, pp.55-61.
- [16]. Francisco F. y E. Velazco (2006) *Instrucciones generales para estudios de reevaluación hidrológica con vistas a la adaptación de aliviaderos bajo el impacto del cambio climático en Cuba*, Servicio Hidrológico Nacional, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana.
- [17]. Francisco, F. et al. *Principales fenómenos hidrometeorológicos extremos máximos que han azotado a Cuba en el período 1963 – 1998* (inédito).
- [18]. Gómez J., A. Ramírez y R. Mejía (2004) *Herramienta para la evaluación de la seguridad hidrológica de presas*, Memorias del XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, Brasil, octubre.
- [19]. *Guía Técnica para la Elaboración de los Planes de Emergencia de Presas* (2001) Secretaría de Estado de Aguas y Costas, Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, junio.
- [20]. *Instructivo de Hidrología para Determinar la Avenida Máxima Ordinaria* (1987) Comisión Nacional del Agua, México, D.F.
- [21]. Linsley, R., M. Kohler y J. Paulhus (1967) *Hidrología para Ingenieros*, Ediciones del Castillo, S. A., Madrid, pp.226-227.

- [22]. Maioni, U., P. Mignosa y M. Tomirotti (2003) *Regional estimation of synthetic design hydrographs*, Intl. J. River Basin Management, vol.1, no.2, IAHR & INBO, pp.151-163.
- [23]. Matakiev, D. (1973) *Algunos aspectos hidrológicos sobre la seguridad de las obras hidráulicas en relación con las avenidas y los criterios de varios autores*, Editorial Organismos, La Habana.
- [24]. Nichiporovich, A. (1973) *Presas de materiales locales*, Editorial Stroiizdat, Moscú.
- [25]. Nodarse, J. (1994) *Gastos máximos, volúmenes e hidrógrafos de las avenidas en cuencas pequeñas*, La Habana.
- [26]. Pérez, O. *Acerca del cálculo de los gastos máximos en pequeñas cuencas*, Rev. "Voluntad Hidráulica", La Habana.
- [27]. Pérez, O. (1988) *Envolventes regionales de avenidas máximas para cuencas cubanas*, Memorias del XIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, t.2, La Habana, pp.168-175.
- [28]. Pérez Suárez, R. (2008) *Los cambios climáticos y los eventos meteorológicos extremos*, IV Taller Uso y Cuidado del Agua, Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba y Sociedad Económica de Amigos del País, La Habana.
- [29]. Pleshkov, Y. (1972) *Regulación del escurrimiento fluvial*, Hidrometeoizdat, Leningrado, cap.XIII, pp.443-492.
- [30]. *Probabilidad de diseño y comprobación para protección contra inundaciones de avenidas de las obras* (1985), NC 48-31.
- [31]. *Obras Hidrotécnicas. Recomendaciones Generales para la Proyección*, SNIP 2.06.01-86, Moscú, 1986.
- [32]. Rúa, J., E. Vázquez y E. Horta (1982) *Categoría de las obras principales; probabilidades de superación de los gastos máximos en los Conjuntos Hidráulicos*, Regulación de Proyectos No.1063, La Habana.
- [33]. Santillán, O. (2004) *Avenidas de diseño con hidrogramas unitarios adimensionales históricos*, Memorias del XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, Brasil, octubre.
- [34]. Sherard, J. et al. (1963) *Earth and earth-rock dams*, Edición Revolucionaria, Instituto del Libro, La Habana.
- [35]. *Tablas de Parámetros Actualizados* (2005) Dirección de Obras Hidráulicas del INRH.
- [36]. Vargas, X. y A. Gómez (1991) *El Hidrograma Unitario Sintético en la modelación de hidrogramas de crecidas pluviales*, Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, vol.2, Valparaíso, Chile, nov., pp.435-448.
- [37]. Vázquez, E. y L. Patulina (1990) *Categoría de las obras hidrotécnicas y probabilidad de superación de los gastos máximos*, Regulación de Proyectos No.001/90, Unión de Empresas de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos, La Habana.
- [38]. Velazco, E. (1999) *Los aliviaderos fusibles: una alternativa idónea contra los impactos del cambio climático*, Conferencia Invitada, Congreso Nacional de Hidráulica, Guayaquil, Ecuador.
- [39]. Velazco, E. (2000) *El diseño hidráulico de los aliviaderos fusibles*, Recomendaciones de Diseño, Grupo Empresarial de Investigaciones, Proyectos e Ingeniería, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana.
- [40]. Velazco, E. (2001) *Un estudio comparativo de alternativas para la modificación de los aliviaderos*, Memorias del V Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica, Sociedad de Ingenieros Hidráulicos de Cuba, UNAIIC, Pinar del Río, pon.39.
- [41]. Velazco, E. (2005) *Diseño hidráulico del sistema de aliviaderos de la presa Melones*, Informe Técnico, Centro de Hidrología y Calidad de las Aguas, La Habana.
- [42]. Velazco, E. (2006a) *Algoritmos, tablas y gráficos generalizados para el tránsito en embalses con aliviaderos automáticos*, Propuesta de Norma Ramal, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana, La Habana.

- [43]. Velazco, E. (2006b) *Algoritmos, tablas y gráficos generalizados para el tránsito en embalses con aliviaderos regulados*, Propuesta de Norma Ramal, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana, La Habana.
- [44]. Velazco, E. (2006c) *Un algoritmo basado en la fórmula de Runge & Kutta para el cálculo de la transformación de las avenidas en los embalses*, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana, La Habana (inédito).
- [45]. Velazco, E. (2008a) *La protección de las presas contra las crecidas extremas y los huracanes tropicales en el nuevo escenario del cambio climático*, IV Taller Uso y Cuidado del Agua, Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba y Sociedad Económica de Amigos del País, La Habana.
- [46]. Velazco, E. (2008b) *Informe-resumen de las actualizaciones de los aliviaderos de las provincias Ciudad de La Habana y Habana*, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana, La Habana, dic.
- [47]. Velazco, E. (2008c) *El Pronóstico Endógeno Dinámico en Tiempo Real de las Avenidas en las Presas*, Presentación al Consejo Técnico Asesor del Grupo Empresarial de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos, La Habana.
- [48]. Velazco, E. (2006-2008) *Actualizaciones aliviaderos presas Bacuranao, La Coca, La Zarza, Caunavaco, Mosquito, La Ruda, Aguas Claras, La Coronela, San Francisco, Pedroso, Mampostón, San Miguel, Pinillos, Jaruco, Canasí, Maurín, Jibacoa, Baracoa, Laguna de Piedras, Niña Bonita*, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana, La Habana.
- [49]. Velazco, E. (2009) *Informe Resumen Gráficos de Prevaciados de 9 Presas de la Provincia La Habana*, Informe Técnico, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana, La Habana, agosto.
- [50]. Velazco, E. (2010) *Cálculos de rotura de presas por rebose de cortinas. Primera etapa: Programa del método simplificado actual*, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana, noviembre.
- [51]. Velazco, E. (2010-2011) NC “*Presa — Protección contra oleaje*”, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana, La Habana.
- [52]. Velazco, E. y C. Buján (2000) *Sistemas de alerta y prevención y medidas estructurales para garantizar la seguridad de los embalses contra los impactos del cambio climático en la República de Cuba*, Seminario Internacional “Los Aludes Torrenciales de Diciembre 1999 en Venezuela”, Universidad Central de Caracas, Venezuela.