

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.*

# La norma mexicana de Operación Segura de Presas. Descripción y primeros resultados

Rodrigo MURILLO-FERNÁNDEZ<sup>a,b,1</sup> y Víctor Hugo ALCOCER-YAMANAKA<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> *Comisión Nacional del Agua*

<sup>b</sup> *Universidad Nacional Autónoma de México*

**Resumen.** Los criterios de diseño, construcción y operación de presas en México se han desarrollado con experiencias propias y procedimientos comunes aplicados otros países; sin embargo, no se habían formalizado los rubros de seguridad, por lo cual se estableció una norma acorde con el medio nacional. Se elaboraron tres partes independientes, la primera establece la clasificación de las obras y la necesidad de efectuar el análisis de riesgo en las grandes presas, por lo que se ha iniciado su aplicación con análisis hidrológicos, geotécnicos y de otro tipo, dependiendo de sus condiciones. Se describen los principales aspectos de la norma, se presentan algunos casos analizados desde el enfoque de la mecánica de suelos, así como el potencial de daños y se emiten algunas conclusiones.

**Palabras Clave.** Presas, norma, análisis de riesgo, casos de estudio.

## 1. Introducción

Nuestro país tiene una amplia tradición en la ejecución de obras hidráulicas desde la época prehispánica. Hoy día perduran algunas presas construidas durante la Colonia, principalmente cortinas rígidas de mampostería, diseñadas y construidas con técnicas europeas. A partir de la consolidación de la Revolución Mexicana, se incorporan ingeniería de diseño y procedimientos de construcción usuales en el vecino país del norte, con lo cual se desarrolla la actual infraestructura nacional representada por más de 6200 presas y bordos de las cuales 980 corresponden a grandes presas de acuerdo a la definición de la Comisión Internacional de Grandes Presas [1].

Durante el siglo pasado, las tecnologías utilizadas fueron principalmente las desarrolladas en Estados Unidos, muchas de las cuales fueron incorporadas a las especificaciones de presas de la Secretaría de Recursos Hidráulicos en las Especificaciones Generales y Técnicas de Construcción o “Libros Rojos” [2], con los cuales se desarrolló la infraestructura nacional. Estos procedimientos de diseño y construcción fueron enriquecidos durante muchos años y se han vertido en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad [3], recientemente actualizado. Sin embargo, esta experiencia no fue vertida en normas de diseño y

---

<sup>1</sup> Corresponding Author, Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Insurgentes Sur 2416, Ciudad de México CP 04540, México; E-mail: rodrigo.murillo@conagua.gob.mx.

construcción como son requeridas en la actualidad conforme a las prácticas mundiales y no se incorporaron las tendencias recientes sobre seguridad y riesgo.

## 2. Desarrollo de la norma

Para realizarla, se formaron Grupos de Trabajo con expertos representativos de instituciones involucradas en diseño, construcción y operación de presas. Los trabajos consistieron en consensar tres partes de la norma: la primera, que define los conceptos básicos, clasifica las presas y establece las bases para un análisis del riesgo de acuerdo a sus características geométricas; la segunda, para establecer el criterio de revisiones físicas a los componentes de las presas; y la tercera parte, para determinar las posibles zonas de afectación en caso de una ruptura o descarga por el vertedor y los principales aspectos para la elaboración de un Plan de Atención de Emergencias y establece una valoración de las posibles consecuencias basada en el producto velocidad-tirante de la inundación, mediante el diagrama de resistencia al vuelco propuesto por Paterson [4] y su empleo en los mapas de vulnerabilidad. La denominación general de esta norma es NMX-AA-175-SCFI, Operación Segura de Presas, con las siguientes Partes: 1.- Análisis de riesgo y clasificación de presas, 2.- Inspecciones de seguridad y 3.- Plan de acción ante emergencias (PAE) [5].

## 3. Contenido de la norma

La primera parte, establece las bases jurídicas de su realización, el campo de aplicación y las definiciones básicas de las estructuras.

La clasificación de las obras se establece en base al potencial de decesos y destrucción aguas abajo en caso de falla o mal funcionamiento, el cual se realiza mediante un análisis formal de riesgo probabilístico.

Inicialmente se establece una clasificación preliminar basada en inspecciones visuales y el historial de comportamiento de las presas, para todas aquellas cuya cortina tenga una altura de cortina mayor que 5 m y se realiza con el siguiente criterio (Tabla 1).

**Tabla 1.** Clasificación preliminar de Riesgo [6], [7].

Clasificación preliminar de Riesgo	Descripción
Alto	La falla de la obra es muy probable y en caso de suscitarse, las afectaciones incluyen la pérdida de vidas humanas o daños ambientales graves.
Medio	La falla de la obra es probable y en caso de suscitarse, las afectaciones serían principalmente materiales y ambientales limitadas.
Bajo	La falla de la obra es poco probable y en caso de suscitarse, las afectaciones materiales serían escasas y limitadas a la obra

Las cortinas entre 5 y 15 m de altura con capacidad mayor que 0.5 hm<sup>3</sup> con clasificación preliminar de riesgo alto y todas las mayores que 15 m deben ser revisadas con un análisis formal, basado en diversos modos de falla con un árbol de eventos y el análisis de las consecuencias de éstos para el más crítico.

Para establecer el evento perturbador se selecciona una avenida probable con su correspondiente periodo de retorno (Tr), los cuales están establecidas por la Conagua [8]

conforme a las dimensiones y posible afectación aguas abajo (Tabla 2), por un sismo de diseño con su correspondiente  $T_r$ , o bien por otro evento perturbador posible.

**Tabla 2.** Periodos de retorno para presas de almacenamiento [8].

Categoría	Almacenamiento ( $hm^3$ )	Altura cortina (m)	Pérdida de vidas en caso de falla	$T_r$ (años)
Bordo	< 0.25	< 15	0-10	100-500
			11-100	250-1000
			>100	500-10,000
Presa pequeña	0.25-3.0	< 15	0-10	1,000
			11-100	1,000-10,000
			>100	10,000 o AMP
Presa grande*	>3.0	>15	Eval. con NMX-AA-175	10,000 o AMP

AMP=Avenida máxima probable. \*Clasificación diferente de ICOLD

Para la evaluación, se utiliza el criterio de Aceptación de riesgo desarrollado por el USBR [9]. Dependiendo de la ubicación en la gráfica Probabilidad anual de falla-Pérdida de vidas ( $f-N$ ), una vez evaluadas las consecuencias, se establece el nivel del riesgo y la necesidad o no de aplicar medidas de mitigación, así como el plazo de realización.

#### 4. Aplicaciones de la norma

A partir de 2016, la Conagua ha utilizado este procedimiento en la valoración del riesgo y sus consecuencias en varias decenas de presas, sobre todo en algunas que estaban clasificadas preliminarmente con alto riesgo.

Más de un centenar de obras se consideran en alto riesgo preliminar, la mayoría de ellas por insuficiencia hidráulica de su vertedor y casi cuarenta presas tuvieron un diagnóstico de anomalías geotécnicas por comportamiento desfavorable al observarse deslizamientos, agrietamientos, erosiones superficiales o recurrentes fallas de sus cortinas. Se estableció un programa de revisión de las deficiencias observadas y en todos los casos se realizó el estudio hidrológico. En este trabajo solo se describirán los aspectos geotécnicos de interés.

Los estudios hidrológicos permitieron establecer los niveles de llenado para su análisis estructural; por ubicarse la mayor parte del país en regiones con alta y media sismicidad, en todas las presas se realizó análisis sísmico.

Por ser una norma nueva, se decidió realizar tanto los estudios determinísticos tradicionales como los probabilísticos recomendados en algunas presas en proceso de diagnóstico formal de riesgo [10]. El procedimiento seguido fue la obtención de información preexistente, la verificación topográfica de las estructuras, determinación de las propiedades geotécnicas representativas, la estimación de las cargas perturbadoras como los llenados y vaciados, así como por sismos, la determinación de los posibles modos de falla, con sus probabilidades de ocurrencia, la determinación de los eventos perturbadores críticos conforme a la sucesión de eventos que podrían conducir a una descarga súbita o importante del agua, con sus correspondientes probabilidades, la determinación de las zonas de inundación y la evaluación de las consecuencias de afectación de la población.

#### 4.1. Modos de Falla

Para los casos con peligro de ruptura de cortina, se estudiaron los modos de falla probables. Para algunas cortinas, fue la estabilidad por deslizamiento; en otros, la ruptura por rebase de la cortina y erosión, en pocos casos fue por tubificación.

Fueron estimados los niveles de almacenamiento de los vasos, con sus frecuencias.

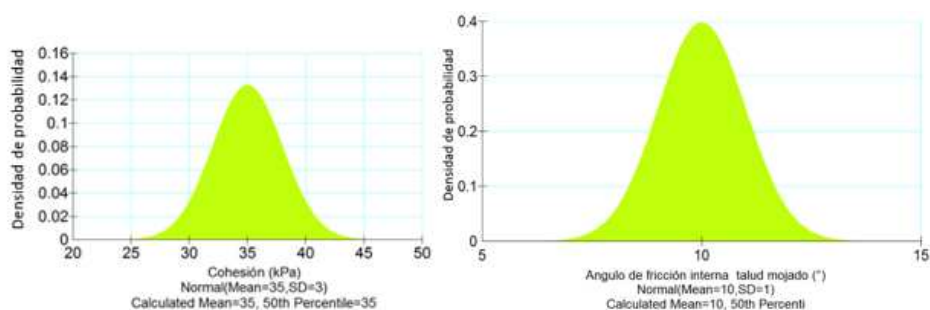
También se determinó la probabilidad anual de excedencia de la carga inducida por sismo, conforme a las características de su terreno de cimentación, en forma probabilista y determinista, de acuerdo a las recomendaciones del Manual de Diseño por Sismo de la Comisión Federal de Electricidad [11].

Determinadas las cargas que influyen en la estabilidad de las cortinas y su probabilidad de ocurrencia, con los valores y rangos de las solicitaciones hidrológicas obtenidos, se establecieron las condiciones de operación de cada presa, como el ejemplo de la Tabla 3.

**Tabla 3.** Condiciones de operación del vaso consideradas y probabilidad de ocurrencia.

Operación	Prob. Ocurrencia	Observaciones
Normal	$3.33 \times 10^{-1}$	Nivel del agua a la cresta de vertido (NAMO)
Inusual	$1.00 \times 10^{-4}$	Llenado total del vaso (NAME)
Extrema	$1.00 \times 10^{-5}$	Desbordamiento de la cortina por 1 h o más

Para calcular las probabilidades de los diferentes modos de falla y la sucesión de eventos concatenados para cada escenario, se determinaron las distribuciones de probabilidad (normal o lognormal) y los parámetros estadísticos de las propiedades de los suelos de la cortina y de la cimentación, basados en los estudios de gabinete y laboratorio de las muestras extraídas, la experiencia del analista, los resultados publicados en la literatura para esos tipo de suelos en particular y las revisiones in situ. Con base en los conocimientos y experiencia de los especialistas en geotecnia que realizaron los estudios, se determinaron las propiedades aleatorias del suelo de las cortinas, tales como los mostrados en la Figura 1.



**Figura 1.** Geoestadística de las propiedades de los suelos con sus funciones de densidad de probabilidad.

Después, se realizaron análisis de sensibilidad del peso volumétrico, la cohesión y el ángulo de fricción interna, en condiciones de operación normal, es decir, con el embalse a nivel del NAMO, así como con carga hidráulica al NAME y con embalse al NAMO y sismo. Uno de los mecanismos de falla más probable es el deslizamiento de taludes, que fue el más estudiado (Figura 2).

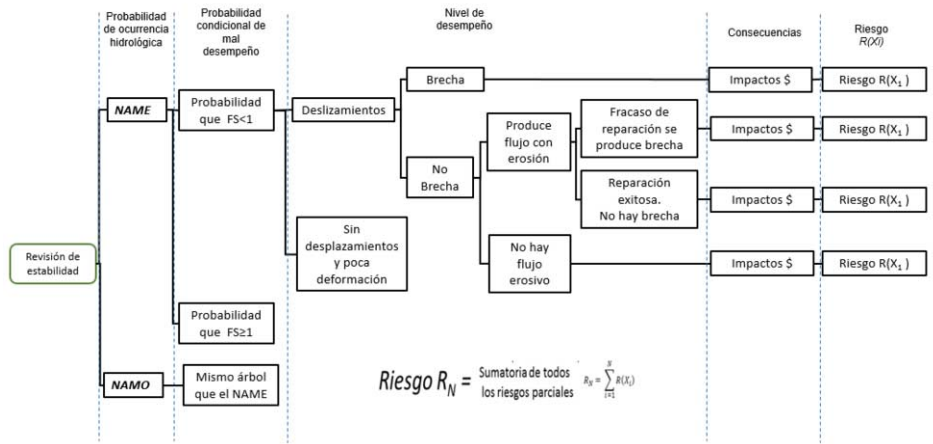


Figura 2. Árbol de eventos de una presa por deslizamiento de taludes.

En los análisis probabilistas de seguridad de la cortina se consideraron las cargas normales (NAMO o vacías) y las inusuales, es decir, con el embalse a nivel del NAME y al NAMO más sismo e incluso otras como llenado y vaciado rápido, conforme al funcionamiento normal del almacenamiento. En la Figura 3 se presenta el análisis probabilista de seguridad del talud aguas abajo de una cortina en condiciones de operación inusual con embalse al nivel del NAMO más excitación sísmica.

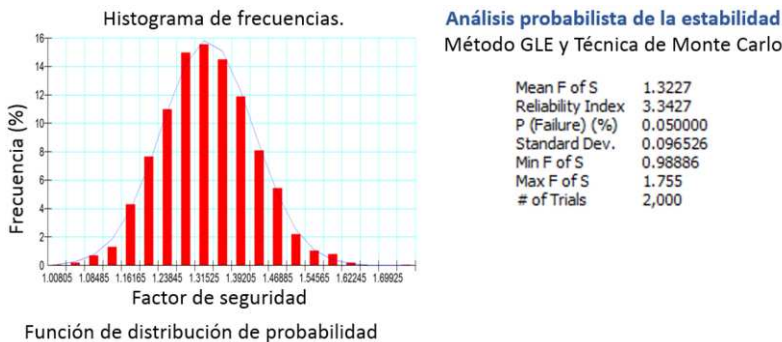


Figura 3. Análisis probabilista del talud aguas abajo durante el sismo con embalse al nivel del NAMO.

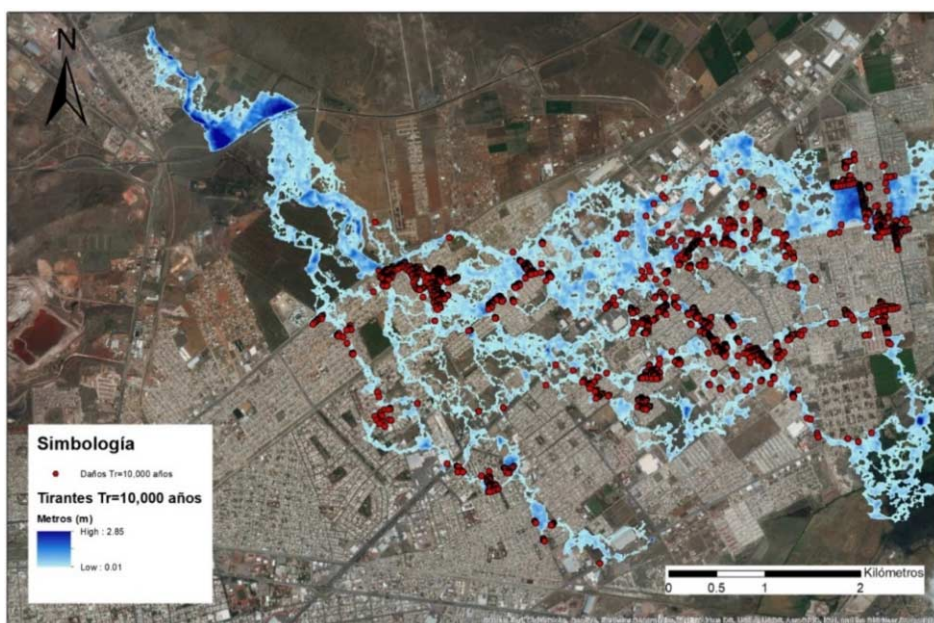
El resultado del análisis con vaso lleno más sismo máximo creíble del talud aguas abajo mostrado resulta con una probabilidad de falla de  $5 \times 10^{-4}$ .

Para la generación de combinaciones de las propiedades de los materiales a utilizar en los estudios se emplearon técnicas como Montecarlo, Taylor y otros. En algunas partes importantes de los eventos, no es factible determinar en forma simple las probabilidades de ocurrencia de los eventos sucesivos tales como en la posible intervención para evitar que continúe la ruptura o si la intervención tendrá el éxito necesario para evitar la falla, así como el resultado del alertamiento a la población expuesta y la respuesta de ésta a las medidas de evacuación o resguardo en sitios seguros, por lo cual deben establecerse probabilidades como las propuestas por Lichtenstein y Newman [12].

#### 4.2. Análisis de severidad

El resultado de este tipo de análisis es un mapa de severidad con los valores máximos del producto de la profundidad con la velocidad del flujo, para cada periodo de retorno ( $h \times vel$ ).

También es posible efectuar el estudio de severidad con la propuesta de Baró-Suárez *et al.* [13] la cual considera las condiciones socioeconómicas de las construcciones y sus habitantes en poblaciones de México, con lo cual es posible obtener las afectaciones en las personas y sus bienes; con ello se obtienen tanto la zona geográfica de afectación como el posible número de defunciones y el daño al menaje. En la Figura 4 se muestra el mapa de daños de una presa aguas arriba de una importante ciudad, para la avenida de diseño y en la tabla 4 las posibles pérdidas en número de vidas y daño al menaje de la población para los periodos de retorno estudiado.

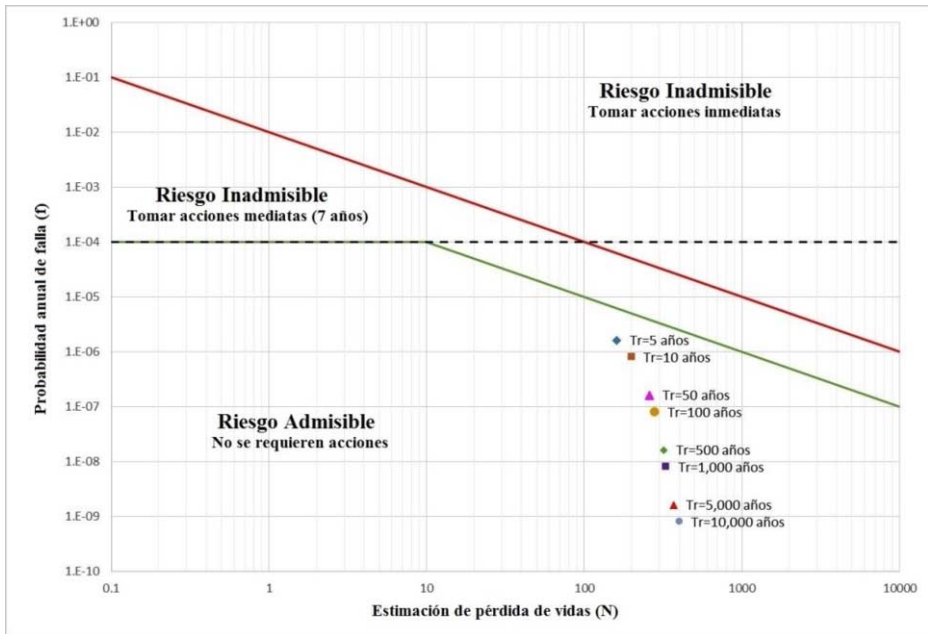


**Figura 4.** Zona de afectación del análisis del riesgo asociado a un  $Tr=10,000$  años.

Así, la probabilidad anual de falla se estima como el producto de la probabilidad de falla por la probabilidad de que ocurra la avenida asociada a algún periodo de retorno. La Figura 5 ejemplifica la estimación de pérdidas de vida y los criterios de aceptación de consecuencias. Se observa que la probabilidad anual de falla de los eventos asociados a los periodos de retorno desde  $Tr=5$  y hasta  $Tr=10,000$  años, caen en la zona de riesgo admisible, por lo cual no se requiere tomar acciones para reducirlo. En otros casos, como en algunas presas de control de avenidas, el análisis de daños por el criterio de Baró *et al.* [13], mostró que para aún para eventos asociados de periodos de retorno bajos (10 años o menos), existen viviendas en riesgo, ya que se localizan dentro del cauce y para cualquier descarga por pequeña que ésta sea, tendrán afectaciones.

**Tabla 4.** Estimación de pérdidas de vidas humanas, según la evaluación de daños por menaje.

Periodo de retorno (años)	Población en riesgo, según evaluación de daños por menaje	Estimación de pérdidas de vidas humanas	Probabilidad anual de falla
5	1,927	160	1.60E-06
10	2,699	200	8.10E-07
50	4,029	260	1.60E-07
100	4,493	280	8.10E-08
500	5,433	320	1.60E-08
1,000	5,753	330	8.10E-09
5,000	6,895	370	1.60E-09
10,000	7,535	400	8.10E-10



**Figura 5.** Aceptación de riesgo para una presa con las avenidas de  $Tr = 5$  años a  $Tr = 10,000$  años.

### 5. Conclusiones

Se han realizado estudios en presas clasificadas preliminarmente con alto riesgo y en general los resultados determinísticos demuestran que los taludes son estables con FS mayores que 1.5 para las condiciones de carga extrema como nivel de agua al NAMO más sismo y nivel de agua al NAME; solo con taludes algo escarpados (1.5hor:1vert o más inclinados) existe riesgo de falla por estabilidad.

Mediante el desarrollo de eventos se ha concluido que aunque en forma determinística existe posibilidad de una falla de tipo geotécnico en algunos casos, al revisar las condiciones para que ésta se produzca a través de eventos concatenados y que no haya medidas de intervención urgentes o medidas de alertamiento, la posibilidad de un desastre resultan pequeñas.



Resulta difícil establecer una distribución probabilística para algunas propiedades de los suelos, sobre todo para aquellos parámetros cuya variabilidad es amplia, como la cohesión o la permeabilidad, sobre todo si se desconoce cómo fueron realizadas las cortinas.

La aplicación de la norma Operación Segura de Presas, enfatiza cuales son los factores relevantes que intervienen en una posible falla de cortina y cuáles son las consecuencias de un derrame extraordinario o ruptura. Además, permite evaluar las medidas de mitigación más convenientes para evitar un desastre.

Si bien la asignación de probabilidades resulta clara en algunos tópicos de la metodología como la determinación de avenidas y sismos y sus periodos de recurrencia, en otros casos depende del conocimiento, experiencia y juicio del especialista en ingeniería de presas para establecer correctamente la sucesión de eventos y su probabilidad de ocurrencia.

## Referencias

- [1] International Commission on Large Dams (2019). [https://www.icold-cigb.org/GB/dams/definition\\_of\\_a\\_large\\_dam.asp](https://www.icold-cigb.org/GB/dams/definition_of_a_large_dam.asp)
- [2] Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) (1962). Especificaciones Generales y Técnicas de Construcción (Libros Rojos). México.
- [3] Comisión Federal de Electricidad (CFE) (1969-1989). Manual de Diseño de Obras Civiles. México.
- [4] Paterson, K. W. (2007). "Dorrigo Flood Study. Final Report". Grafton, Australia: Bellingen Shire Council.
- [5] Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI) (2018). <https://www.sinec.gob.mx/SINEC/Vista/Normalizacion/BusquedaNormas.xhtml>
- [6] Comisión Nacional del Agua (Conagua) (2000). Manual de capacitación en seguridad de presas, Subdirección General Técnica, Gerencia de Ingeniería Básica y Normas Técnicas. México.
- [7] Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2004). Federal Guidelines for Dam Safety. USA.
- [8] Comisión Nacional del Agua (Conagua) (2017, No publicado). "Memorando BOO.07.616 Subdirección General Técnica, 13 de septiembre, Periodos de retorno aplicables a las diferentes obras hidráulicas". Ciudad de México.
- [9] US Bureau of Reclamation (USBR) (2003). Dam Safety Risk Analysis Methodology. Department of Interior, V 3.3.1, Denver.
- [10] Instituto de Ingeniería (II) UNAM (2016). Estudios especializados a presas en alto riesgo del noroeste del país, México.
- [11] Comisión Federal de Electricidad (CFE) (2015). Manual de Diseño de Obras Civiles, Sección C: Estructuras, Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño, Capítulo C.1.3 Diseño por Sismo, México.
- [12] Lichtenstein S. & Newman J. R. (1967). "Empirical scaling of common verbal phrases associated with numerical probabilities". Psychonomic Science. Vol. 9.
- [13] Baró-Suárez, J. E., Díaz-Delgado, C., Calderón-Aragón, G., Esteller-Alberich, M. V. & Cadena-Vargas, E. (2011). "Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México". Tecnología y Ciencias del Agua, II (3), 201-218.