Artículo: COMEII-16039

II CONGRESO NACIONAL
DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2016
Chapingo, Edo. de México, del 08 al 10 de septiembre

METODOLOGÍA DE APLICACIÓN PARA EL ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RIESGO EN SEGURIDAD DE PRESAS

Rafael Antonio Briseño Ramiro[1*]; Gisselle Orozco Bustos[2]

[1]Coordinación de Hidráulica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 62550 Jiutepec, Morelos, México. rbrisen@tlaloc.imta.mx. (Autor para correspondencia).

[2]Consultora independiente, Morelos, México.

Resumen

Hasta fechas recientes, la seguridad de presas en México se había centrado en conocer las características de los principales componentes de la presa con un enfoque determinista, este enfoque se ha mostrado insuficiente para evaluar adecuadamente el potencial de riesgo de una presa, ya que pueden existir presas con poblaciones aguas abajo con escasas posibilidades de que ocurra una falla o sin afectaciones graves, por otro lado se deja de atender oportunamente a presas que requieran acciones urgentes para reducir riesgos.

Ante este panorama, la norma mexicana NMX-AA-175-SCFI-2015 “Operación Segura de Presas”, Parte 1 se refiere al campo de seguridad de presas con metodologías basadas en estimaciones del riesgo. Éste se estima combinando las probabilidades de ocurrencia referido a los escenarios de solicitación (avenida, un sismo u operación normal), por las probabilidades condicionales de que éstas solicitaciones produzcan la falla de la presa (método de árbol de eventos o analítico) y las consecuencias asociadas en caso de falla (pérdidas de vidas, económicas o daños medioambientales).

El presente artículo expone la metodología para el Análisis de probabilidad de falla y Evaluación del Riesgo de tres presas, por medio del método de árboles de eventos: Caso 1 Inestabilidad del muro de mampostería con respaldo de tierra por presa vacía; Caso 2 Colapso de la sobre elevación de la cortina de mampostería debido a un desbordamiento; y Caso 3 Desbordamiento por insuficiencia del vertedor y erosión regresiva en una presa de tierra homogénea.

Palabras clave: NMX-AA-175-SCFI-2015, árbol de eventos, modo de falla, mitigación.

Introducción

La norma mexicana NMX-AA-175-SCFI-2015 “Operación Segura de Presas. Parte 1.- Análisis de Riesgo y Clasificación de Presas” fue aprobada por La Dirección General de Normas de la Secretaría de Economía, cuya declaratoria de vigencia fue publicada en el año 2015 por el Diario Oficial de la Federación, la cual establece los requisitos que deben cumplir las presas en operación en el territorio nacional para determinar su grado de riesgo o potencial de daños en la zona de posible inundación aguas abajo debido a la operación, falta de mantenimiento o de cuidado de las presas, por una descarga, o por falla parcial o total de la presa.

En la norma NMX-AA-175-SCFI-2015 se menciona que “El responsable debe efectuar una evaluación de las condiciones estructurales y funcionales de la presa y el estudio de la zona de inundación aguas abajo para diferentes eventos probables, con objeto de clasificarla en función de su potencial de daños debido a su operación, una descarga extraordinaria o falla parcial o total de la presa”.

De acuerdo con lo anterior, se debe hacer una clasificación preliminar de riesgo de la presa si presenta una altura máxima de la cortina con más de 5 m y/o capacidad de almacenamiento mayor de 500,000 m^3 al NAMO. En caso de detectar la presa en alto riesgo se debe realizar un estudio formal del riesgo.

En dicha norma se define a una presa en alto riesgo cuando 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.

El riesgo anualizado de las presas se expresa con la fórmula:

$$R_{N,\$} \approx \rho_c \; x \; \rho_R \; x \; C_{N,\$} \qquad (1)$$

Donde:

$R_{N,\$}$ = Riesgo anualizado expresado en términos de pérdida de vidas (H) o en términos monetarios del daño ($).

ρ_c =Probabilidad anual de ocurrencia de una amenaza o acción que pueda causar la falla de la presa: carga hidráulica del embalse, carga sísmica, desbordamiento, entre otros.

ρ_R = Probabilidad anual de ocurrencia de un mecanismo de falla o de la respuesta de la presa dada la ocurrencia de ρ_c.

$C_{N,\$}$ = Consecuencia de la falla de una presa expresada en términos de pérdida de vidas (H) o en términos monetarios del daño ($), dada la ocurrencia de ρ_R

Metodología

Una evaluación preliminar de la clasificación de una presa puede hacerse con base en un reconocimiento de campo de las estructuras de la presa y en una revisión de los datos disponibles, reconocer las condiciones de las estructuras y el área de posible afectación aguas abajo para observar qué consecuencias potenciales

existen. La probabilidad de que la gente y sus propiedades se afecten debido a una inundación por una falla o mal funcionamiento de la presa se evalúa entonces en forma empírica y se asigna una clasificación preliminar.

Las presas que resulten con una clasificación preliminar de potencial de daños alto, deberán evaluarse mediante un análisis o estudio formal de riesgo. En la Figura 1 se muestra la metodología propuesta para el Análisis y Evaluación del Riesgo.

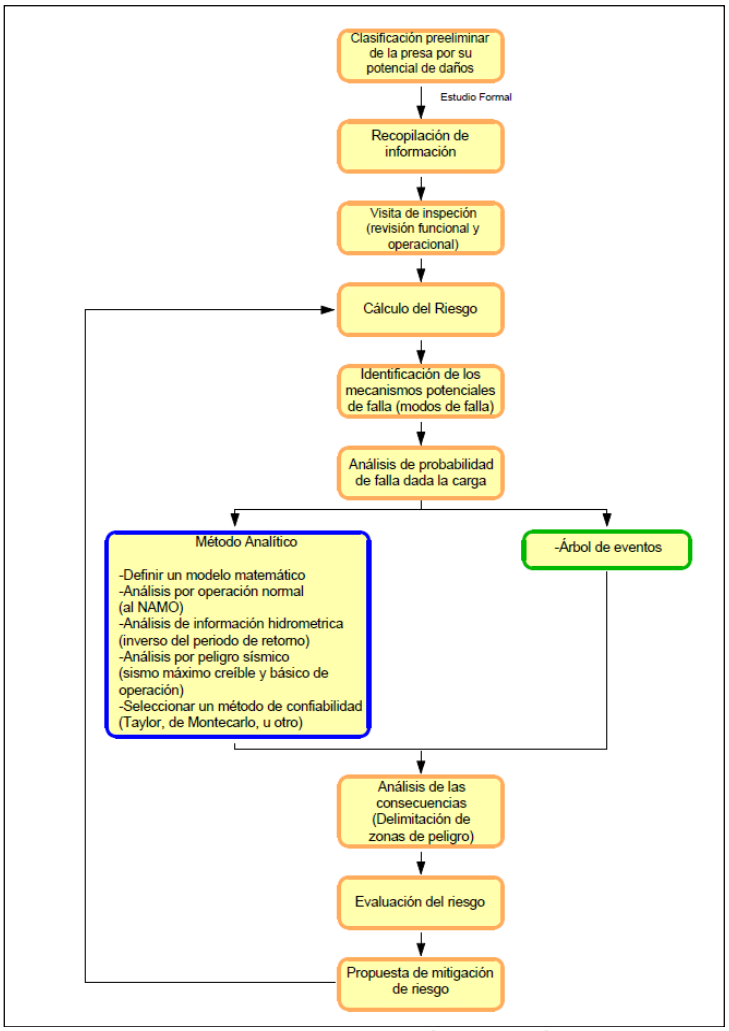

Figura 1. Procesos que componen la metodología de Análisis y Evaluación del Riesgo.

A continuación se propone una metodología para el análisis y evaluación del riesgo, complementado con un estudio formal:

1. **Identificación de los mecanismos potenciales de falla (modos de falla)**

El modo de falla es la secuencia particular de eventos que puede dar lugar a un funcionamiento inadecuado del sistema presa - embalse o una parte del mismo.

Esta serie de sucesos se asocia a un determinado escenario de solicitación, según el evento inicial que desencadena la falla. Estos escenarios pueden definir eventos extremos, como el escenario hidrológico, que hace referencia a las avenidas, y el escenario sísmico, para los terremotos. Además, también se puede considerar el escenario normal, que trata la situación del día a día.

El Cuadro 1 muestra diferentes modos de falla de acuerdo al tipo de presa. La identificación es una parte fundamental del proceso de Análisis de Riesgo que se realiza en grupo y que trata de identificar, describir y estructurar todas las posibles formas en que la presa puede fallar, sin restringirse a una lista predeterminada de comprobaciones y, además, determina la magnitud y contexto del trabajo restante.

Cuadro 1. Diferentes modos de falla de acuerdo al tipo de presa.

Tipos de presas	Modos de falla	
Gravedad de Mampostería	Colapso por erosión regresiva debido al desbordamiento	
	Rotura por desbordamiento	
	Deslizamiento por discontinuidad en roca de cimentación, incluyendo “discontinuidad” en cuerpo de cortina	
Tierra y Enrocamiento Homogénea o Graduada	Erosión interna	Por el cuerpo de terraplén
		Por terreno de cimentación
		Por contacto con conductos de obras de toma
		Por el contacto con muros rígidos
	Deslizamientos de talud/ cimentación	Aguas arriba por el vaciado “rápido” desde el NAMO
		Aguas arriba por saturación al NAMO más Sismos Máximo Creíble y Básico de Operación
		Talud aguas arriba por fuerzas de filtración al NAMO más Sismos Máximo Creíble y Básico de Operación
	Desbordamiento	Por insuficiencia de vertedor, erosión regresiva en talud aguas abajo
		Por pérdida de bordo libre (hundimientos, roderas; grietas de secado), erosión regresiva en talud aguas abajo

2. Análisis de probabilidades de falla dada la carga

2.1 Árbol de eventos

El árbol de eventos es una representación de un modelo lógico que incluye todos los posibles escenarios que se derivan de un evento inicial. Como su propio nombre indica se fundamenta en la estructura matemática conocida como árbol y que es ampliamente utilizada en muchos otros ámbitos.

En cuanto al significado de las probabilidades que aparecen en los árboles de eventos, excepto para el evento inicial, éstas son siempre probabilidades

condicionales. Es decir asumen que todos los eventos precedentes (nodos padres) ya han ocurrido, las probabilidades de falla se estiman apoyándose en la caracterización previa de los modos de falla, con la ayuda de un juicio experto y/o análisis de fiabilidad.

Identificar los peligros a través de la secuencia de eventos, escenarios o mecanismos potenciales que pueden conducir a la falla de la presa y estimar la probabilidad de ocurrencia de los mismos para determinar la probabilidad combinada de falla.

El objetivo es llegar a una tabla, la cual consta de una fila para cada posible cadena de eventos donde se recoge su probabilidad (que es el resultado de multiplicar todas las probabilidades condicionales de sus ramas) y los valores que han ido tomando las distintas variables.

Una vez obtenida la tabla, el cómputo de los distintos resultados que se requieren de un análisis de riesgo es relativamente sencillo. Por ejemplo, para calcular la probabilidad de rotura de la presa, simplemente hay que sumar las probabilidades de aquellos caminos en los que la presa haya roto. Para calcular el riesgo, en cada rama se multiplica su probabilidad por el valor de la variable que defina las consecuencias (pérdidas económicas o pérdida de vidas) obteniendo así el riesgo de cada rama. Sumando las probabilidades estimadas de todas las ramas se obtiene la probabilidad total de la presa.

La probabilidad en cada uno de los nodos de un árbol de eventos se puede discutir, calificar y sintetizarse conforme se indica en los cuadros 3, 4 y 5.

2.2 Método Analítico

Primero se debe definir un modelo matemático o numérico que simule el mecanismo de falla identificado, después se realiza el análisis de información hidrométrica y por peligro sísmico, establecer variables con nula o poca incertidumbre, y las que tienen que considerarse como aleatorias en el análisis. Para cada variable, se define dos tipos de distribución de la incertidumbre; una natural asociada a procesos naturales y la otra se debe derivar del desconocimiento de la información de la presa analizada (distribución epistémica). Se selecciona un método de confiabilidad a utilizar en el modelo para estimar la falla de la presa, se calcula la probabilidad de falla para cada condición de carga y las distribuciones de probabilidad establecidas para las incertidumbres naturales, obteniendo la curva de fragilidad, posteriormente se seleccionan grupos de variables aleatorias de la distribución de variables de incertidumbres epistémicas y por cada grupo de variables se estima la curva de fragilidad, pero se debe utilizar dichos valores de variables aleatorias muestreados como un nuevo “promedio” de la distribución de variables naturales, que se asume sin cambios. Esta familia de curvas tomará en cuenta las incertidumbres naturales y epistémicas de la presa. Por último se verifican los resultados y se lleva a cabo un

análisis de sensibilidad de las decisiones previamente tomadas (Altarejos et al 2015).

3. Analizar las consecuencias con base en el escenario de falla más crítico

Se recomienda realizar un estudio formal de la delimitación de zonas de peligro por medio de un modelo bidimensional tipo Dam Break, para determinar el polígono del área de la mancha de inundación provocada por la rotura súbita de la presa con nivel de agua al NAMO, verificar los lineamientos para la elaboración de los mapas de peligro por inundación de la GASIR, por lo cual se debe contabilizar el número de seres humanos que ocupan tal polígono.

4. Evaluación del Riesgo

El riesgo se estima combinando las probabilidades de ocurrencia referido a los escenarios de solicitación (avenida, un sismo u operación normal), con las probabilidades condicionales de que estas solicitaciones produzcan la falla de la presa (método de árbol de eventos o analítico) y sus consecuencias asociadas si la presa fallara (pérdidas de vidas, económicas o daños medioambientales).

5. Propuestas de medidas de mitigación del riesgo

En cada presa se evaluará el riesgo; como resultado del estudio, de cada presa se describirán al menos tres alternativas de modificación para atenuar el riesgo a niveles aceptables, y además una de ellas se seleccionará como la opción más rentable.

Existe una gran variedad de alternativas que pueden ser implementadas para mejorar la seguridad de una presa, pueden ser divididas en estructurales y no estructurales. En el Cuadro 2 se muestra un resumen de las medidas de mitigación de riesgo más empleadas.

Cuadro 2. Medidas de mitigación del riesgo más empleadas para presas.

Estructurales	Rehabilitación de la presa con material adecuado
	Rectificación de taludes de acuerdo a la revisión de estabilidad
	Aumento del nivel de la corona (sobreelevación)
	Diseño adecuado para la suficiencia hidráulica de la obra de excedencias, de acuerdo al estudio hidrológico
	Aumento de la capacidad hidráulica (puentes y alcantarillas) sobre el cauce aguas abajo
	Mantenimiento a las obras de toma, excedencias y desfogue
No estructurales	Optimización de las reglas y política de operación
	Establecimiento de albergues
	Mejora del sistema de medición de la instrumentación de la presa
	Implantación del Plan de Emergencias
	Delimitación de zonas de peligro y zonas federales
	Modificación del ordenamiento territorial/planeación urbana
	Capacitación al operador de la obra ante un escenario adverso

Resultados

A continuación se presentan casos de aplicación para el análisis de probabilidad de falla por el método de árbol de eventos y la Evaluación del riesgo de 3 presas:

Caso 1. Inestabilidad del muro por presa vacía en una presa de muro con respaldo de tierra

Esta presa presenta desplomes hacia el paramento aguas arriba y grietas estructurales; su estabilidad sólo se debe a las reservas de resistencia que tiene el suelo del respaldo de tierra (Figura 2).

Figura 2. Muro inestable con desplomes hacia el vaso por presa vacía (presa de mampostería con respaldo de tierra).

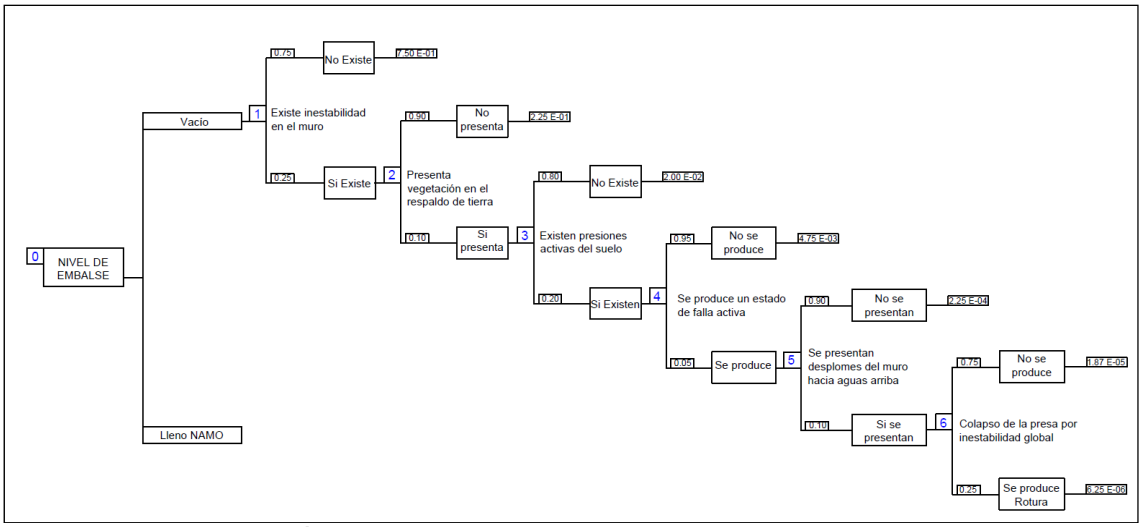

Figura 3. Ejemplo de árbol de eventos del modo de rotura por colapso del muro y sus probabilidades condicionales (presa de muro con respaldo de tierra).

Cuadro 3. Ejemplo de ficha usada en el cálculo de probabilidades condicionales en los nodos de árboles de eventos (presa de muro con respaldo de tierra).

		MODO DE FALLA:	Presiones activas del suelo del respaldo de tierra que se apoya contra el muro
PRESA:	Muro con respaldo de tierra		
RAMA ÁRBOL:	3.Presiones activas del suelo		
EVENTO:	Si Existen		

ESTIMACIÓN DE PROBABILIDAD

Límite inferior razonable	**Estimación media**	**Límite superior razonable**
0.1	**0.2**	**0.3**

FACTORES A FAVOR	**FACTORES EN CONTRA**
-Presenta problemas de erosión por lluvia en el talud aguas abajo. -Presenta vegetación mayor (arbórea) en todo el cuerpo del respaldo de tierra. -Filtraciones excesivas en el respaldo aguas abajo. -Presenta infiltraciones por grietas -Tiene desplomes en diversas zonas del muro hacia aguas arriba. -Deficiencias en su diseño y cimentación.	-Las infiltraciones en el terreno natural (arenas limosas) no constituyen un problema.

NOTAS:
Para estimar la probabilidad de rotura asociada a este modo de falla, se han utilizado los resultados obtenidos, mediante análisis estructural, en el modo de falla asociado con el colapso de la presa por inestabilidad global. Junto con los mencionados cálculos se ha combinado el juicio ingenieril de los autores.

Caso 2. Colapso en el contacto entre la cortina de mampostería y la parte nueva que se sobre elevó por desbordamiento en una presa de mampostería

Sobreelevaciones sin anclaje a la cortina, obra de excedencias sin capacidad hidráulica ante una avenida extraordinaria (Figura 4).

Figura 4. Colapso en el contacto entre la cortina de mampostería y la parte nueva que se sobre elevó por desbordamiento (presa de mampostería)

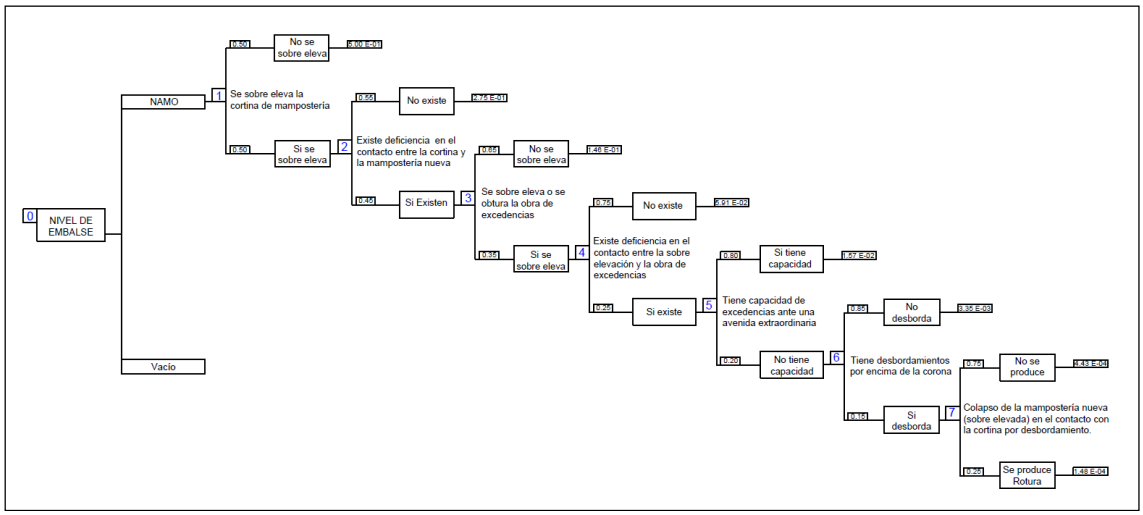

Figura 5. Ejemplo de árbol de eventos del modo de rotura por colapso de la mampostería sobre elevada (presa de mampostería).

Cuadro 4. Ejemplo de ficha usada en el cálculo de probabilidades condicionales en los nodos de árboles de eventos (presa de mampostería).

		MODO DE FALLA:	Colapso de la mampostería nueva (sobre elevada) en el contacto con la cortina por desbordamiento.
PRESA:	Rígida de mampostería		
RAMA	2.Existe deficiencia entre el contacto de la cortina y la mampostería nueva		
ÁRBOL:			
EVENTO:	Si existe		

ESTIMACIÓN DE PROBABILIDAD

Límite inferior razonable	**Estimación media**	**Límite superior razonable**
0.4	**0.45**	**0.5**

FACTORES A FAVOR	**FACTORES EN CONTRA**
-Sobre elevación de mampostería nueva sin anclaje a la cortina -Sobre elevación u obturación de la obra de excedencias -Desbordamientos por disminución de la capacidad de desfogue.	-La cortina original de mampostería tiene más de 80 años funcionando y soporta desbordamientos por encima de la corona -De acuerdo a la revisión de estabilidad de taludes la cortina original es estable ante todas las solicitaciones.

NOTAS:
Para estimar la probabilidad de rotura asociada a este modo de falla, se han utilizado los resultados obtenidos, mediante análisis de estabilidad, en el modo de falla asociado con el colapso de la mampostería nueva (sobre elevada) en el contacto con la cortina por desbordamiento. Junto con los mencionados cálculos se ha combinado el juicio ingenieril de los autores.

Caso 3. Desbordamiento por insuficiencia del vertedor y erosión regresiva en una presa de tierra homogénea

Los materiales no tienen las características adecuadas para la construcción de una cortina de sección homogénea, sin técnica de compactación, con deslizamientos en ambos respaldos, una deficiente nivelación del bordo y asentamientos significativos. En la Figura 6 se muestra el momento de la falla en su primer llenado, por insuficiencia de la obra de excedencias, también se aprecian los deslizamientos del talud aguas abajo por colapso del vertedor y erosión regresiva de la cortina.

Figura 6. Colapso en la zona de la obra de excedencias por erosión regresiva al pie de la cortina debido al desbordamiento (presa homogénea de tierra con deficiencias en el diseño y construcción).

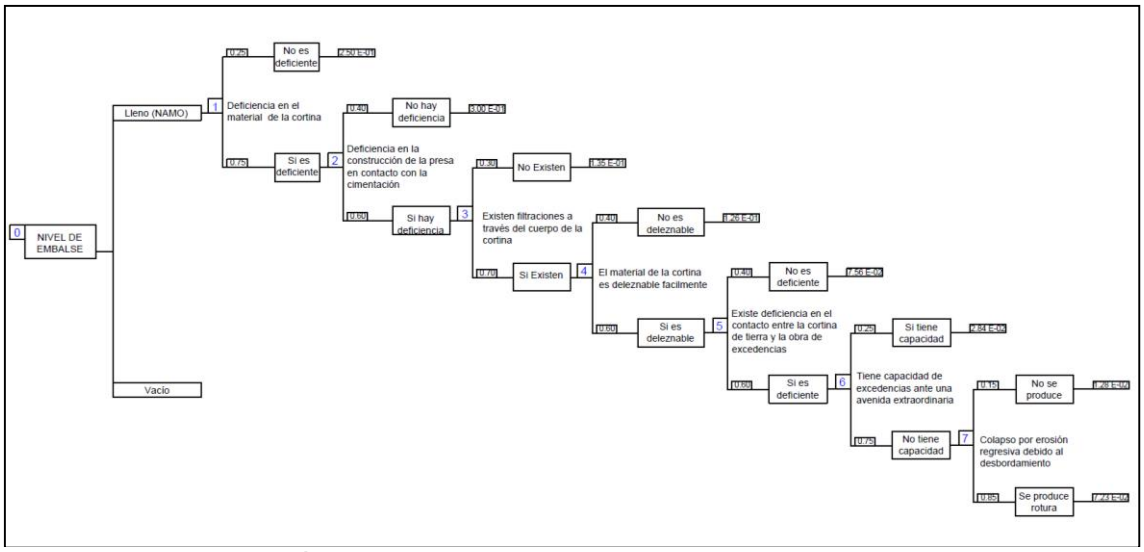

Figura 7. Ejemplo de árbol de eventos del modo de rotura por colapso de la presa por desbordamiento y sus probabilidades condicionales (presa homogénea de tierra).

Cuadro 5. Ejemplo de ficha usada en el cálculo de probabilidades condicionales en los nodos de árboles de eventos (presa homogénea de tierra).

		MODO DE FALLA:	Colapso por erosión regresiva debido al desbordamiento
PRESA:	Homogénea de tierra		
RAMA ÁRBOL:	4. El material de la cortina es deleznable fácilmente		
EVENTO:	Si es deleznable		

ESTIMACIÓN DE PROBABILIDAD

Límite inferior razonable	**Estimación media**	**Límite superior razonable**
0.55	**0.6**	**0.65**

FACTORES A FAVOR	**FACTORES EN CONTRA**
-Vertedor insuficiente -Material no adecuado para la construcción, sin técnica de compactación -Presenta filtraciones al pie del talud -Deficiencias en su diseño y cimentación.	

NOTAS:
Para estimar la probabilidad de rotura asociada a este modo de falla, se han utilizado los resultados obtenidos, mediante análisis geotécnico y estructural, en el modo de falla asociado con la erosión regresiva debido al desbordamiento. Junto con los mencionados cálculos se ha combinado el juicio ingenieril de los autores.

Clasificación de consecuencias de los tres casos

Para este artículo se consideró la clasificación de consecuencias de acuerdo a los posibles daños materiales y a la pérdida de vidas humanas basadas en la norma NMX-AA-175-SCFI-2015.

Para el caso de la presa de muro con respaldo de tierra se consideró una consecuencia baja con una pérdida de vidas menor a 1 personas debido a que la presa se encuentra vacía y la cuenca propia es pequeña y la posible falla causaría sólo daños en zonas agrícolas. En cuanto a la presa de mampostería se consideró una consecuencia media o significativa con más de 10 personas con pérdida de vidas de acuerdo a los posibles daños a zonas rurales e interrupción de vías de comunicación e instalaciones no esenciales. Para el caso de la presa homogénea se ubicó en una consecuencia alta al considerar una pérdida de vidas mayor de 100 personas con daños a casas habitación, interrupción de vías de comunicación, instalaciones y ambientales. Para el estudio formal de las consecuencias, se recomienda realizar los modelos de inundación para la elaboración de los mapas de peligro por inundación (GASIR, 2014).

Evaluación del Riesgo de los tres casos

En cada presa y con base en las probabilidades de falla dada la carga y las consideraciones de las consecuencias de pérdidas de vidas humanas, se evalúo el riesgo vigente (Figura 8). Por lo que se recomienda describir tres alternativas de modificación para atenuar el riesgo y calcular nuevamente hasta calcular a niveles aceptables. Las alternativas pueden incluir el caso, de poner fuera de servicio la presa o de restricciones de niveles de operación en el embalse.

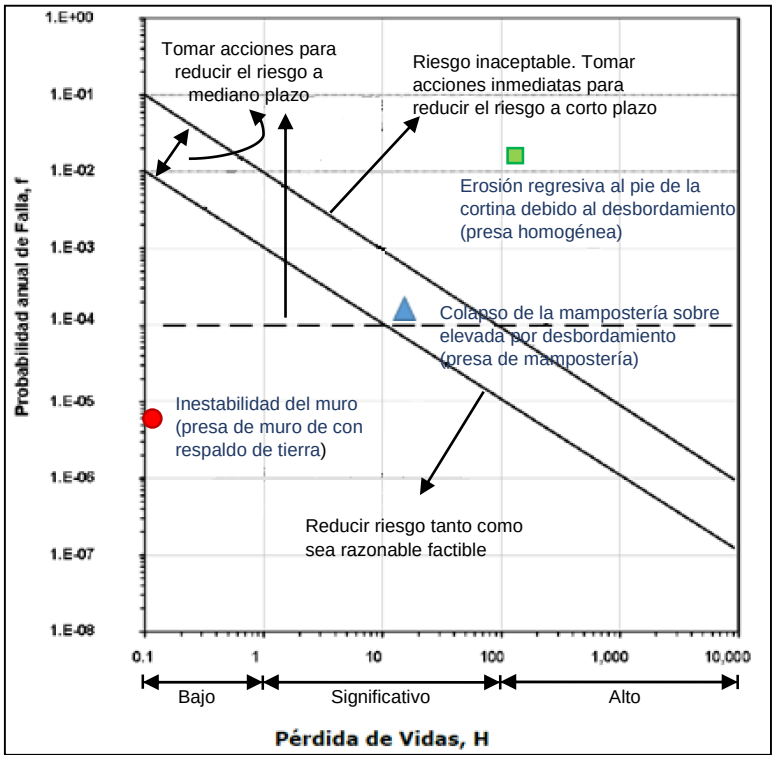

Figura 8. Criterios de aceptación del riesgo.

Conclusiones

Una de las utilidades principales de la metodología propuesta en la norma NMX-AA-175-SCFI-2015 es la clasificación de presas en una fase previa, como ayuda para la organización, planificación y asignación de recursos a programas de seguridad mediante la identificación de aquellas presas con niveles de riesgo más elevados, además es una ayuda importante en la comprensión de los múltiples aspectos que hacen a la seguridad, exponen con más claridad las incertidumbres existentes y permite detectar aspectos débiles del sistema no siempre visibles en la práctica tradicional.

El presente artículo expone tres casos de aplicación conforme a la norma: Caso 1. La presa de muro con respaldo de tierra se encontró en la zona baja en cuanto a pérdidas de vidas debido a que el embalse se puede controlar aguas arriba y se

mantiene vacío, por lo tanto el riesgo de la presa se limita al carácter estructural de la obra, se recomienda poner fuera de servicio; Caso 2. La presa de mampostería se ubicó en una zona media o significativa en cuanto a daños a la población, donde sólo causó daños a la propia presa y algunas casas cercanas al cauce, se recomienda tomar acciones para reducir el riesgo a mediano plazo; y Caso 3. La presa homogénea de tierra se halló en riesgo inaceptable, por lo que se recomienda realizar un estudio formal del rompimiento de la presa, al obtener una probabilidad mayor de $1.E^{-02}$ y analizar tres acciones inmediatas para mitigar los riesgos a corto plazo.

Estas presas fueron analizadas por el método de árboles de eventos, que es una herramienta básica y sencilla para la estimación de probabilidades asociadas a un modo de falla, por otra parte se mencionó el método analítico, el cual puede complementarse para obtener un mejor análisis y confiabilidad de los resultados.

Referencias bibliográficas

Capítulo 11. Practical Risk Assessment for Embankments, Dams, and Slopes, del libro Risk and Reliability in Geotechnical Engineering, Altarejos-García L., Silva-Tulla F., Escudero-Biebo I., Morales-Torres A. Taylor an Francia Book, 2015.

Comité Nacional Español de Grandes Presas. (2005). Guía Técnica de Explotación de Presas y Embalses tomo I, Análisis de riesgos aplicado a la gestión de seguridad de presas y embalses. España.

Lineamientos para la Elaboración de Mapas de Peligro por Inundación, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería en Ríos, 2014.

Norma Mexicana NMX-AA-175-SCFI-2015 "Operación segura de presas. Parte Uno. Análisis de Riesgo y Clasificación de presas", Secretaría de Economía, 2015.

Ortuño, M. G. (s.f.). Aplicación del Análisis de Riesgos. España: UPV.

Rubio Gutiérrez Horacio, Martínez Ramírez Efrén, Meza Castillo Alfredo, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, CONAGUA, “Evaluación de la Longitud de Peligro por Rompimiento de Bordos de Almacenamiento con capacidad menor a 250,000 m^3”, XXII Congreso Nacional de Hidráulica, Acapulco, Guerrero, México, noviembre 2012, p.1-7.

Serrano-Lombillo. *Desarrollo de una herramienta completa de análisis y evaluación de riesgos en seguridad de presas*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2011. Dir: Escuder-Bueno, I., Co-Dir: Gómez de Membrillera-Ortuño, M.