

ESTIMACIÓN DE LAS MAGNITUDES ASOCIADAS CON EL ROMPIMIENTO DE PRESAS DE TIERRA O ENROCAMIENTO A TRAVÉS DEL MÉTODO ESTADÍSTICO

• Daniel Francisco Campos-Aranda •

Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

*Autor de correspondencia

Resumen

CAMPOS-ARANDA, D.F. Estimación de las magnitudes asociadas con el rompimiento de presas de tierra o enrocamiento a través del método estadístico. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. V, núm. 3, mayo-junio de 2014, pp. 159-172.

Los estudios de seguridad de presas definen los planes de emergencia y las estrategias de mitigación de riesgos en sus áreas localizadas aguas abajo. Tales estudios abarcan la estimación de las magnitudes originadas por el rompimiento de su cortina, las cuales incluyen la geometría de la brecha de falla, el tiempo de desarrollo de ésta y el gasto máximo de descarga. Existen tres enfoques de estimación de las características citadas: (1) el *método estadístico*, que aplica ecuaciones empíricas obtenidas por regresión; (2) el *método hidráulico*, el cual simula numéricamente la formación de la brecha de falla, tomando en cuenta los mecanismos hidráulicos y de erosión del flujo, y (3) el *método experimental* o de laboratorio que utiliza modelos reducidos o a escala real. En este trabajo se aplica el enfoque estadístico basado en 28 ecuaciones empíricas que se han establecido como las más confiables o de menor incertidumbre. Se describen dos aplicaciones numéricas hipotéticas: la primera en una presa pequeña que falla por desbordamiento; la segunda en una presa de mediana altura, cuya falla se debe a la erosión interna que generan las filtraciones; en ambas aplicaciones se siguen dos planteamientos de análisis, función de la información disponible. Se concluye que la recopilación expuesta de 28 ecuaciones empíricas permite establecer los valores probables de las magnitudes asociadas con la falla de presas con cortinas de tierra o de enrocamiento, así como sus intervalos de variación.

Palabras clave: cortinas de tierra, cortinas de enrocamiento, desbordamiento, tubificación, brecha de falla, tiempo de formación de la brecha, gasto máximo de descarga.

Abstract

CAMPOS-ARANDA, D.F. Estimate of the Magnitudes of Ruptures of Earth or Rockfill Dams using a Statistical Method. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. V, No. 3, May-June, 2014, pp. 159-172.

Studies of dam safety define emergency plans and strategies to mitigate risks in underwater areas. These studies involve the estimate of the magnitudes of dam ruptures, which include the geometry of the failure breach, the time it took to develop and peak discharge flow. Three approaches to estimating these characteristics exist: (1) the statistical method which applies empirical equations obtained through regression, (2) the hydraulic method which numerically simulates the development of the failure breach, taking into account hydraulic mechanisms and flow erosion and (3) the experimental method or laboratory method which uses models at reduced or actual scale. This work applies the statistical approach based on 28 empirical equations which have been established as most reliable or having the least uncertainty. Two hypothetical numerical applications are described—the first for a small dam with failure due to overtopping and the second for a dam of medium height which failed due to internal erosion that caused filtrations. Both applications follow two analytical approaches depending on the available information. It is concluded that the collection of the 28 empirical equations makes it possible to establish the probable values for the magnitudes associated with the failure of earth or rockfill dams, as well as variation intervals.

Keywords: Earth dam, rockfill dam, overtopping, piping, failure breach, time to develop breach, peak discharge flow.

Introducción

A partir de los años ochenta creció el interés en el mundo por la seguridad de las presas, teniendo como objetivo fundamental la reducción de la pérdida de vidas humanas y de los daños materiales aguas abajo causados por su falla o rompimiento. En realidad, la falla de presas es infrecuente, pero sus consecuencias son, en general, catastróficas (NWS, 2002).

Se han construido más de 800 000 presas en el orbe, así como miles de kilómetros de diques o bordos de protección a ciudades y zonas con potencial económico. La historia de su construcción también registra que cientos de presas han fallado en los últimos siglos y que actualmente cada año se rompen tramos de diques o bordos debido a su desbordamiento u otras causas (Zagonjoli, 2007). Ejemplos dramáticos de esto último son la ciudad de Nueva Orleans, Estados Unidos, en agosto de 2005, bajo la influencia del huracán *Katrina*, y la zona de Chalco en el Valle de México, con la falla periódica de los bordos del río o canal de La Compañía.

En general, todas las presas están sujetas a envejecimiento y como resultado de ello se vuelven más peligrosas, por ser más susceptibles de fallar por deficiencias en su operación o por desbordamiento asociado con su azolvamiento; esto último, principalmente en presas pequeñas, que son la mayoría. Además, las presas antiguas fueron diseñadas con información escasa y construidas quizás con criterios menos estrictos que los seguidos hoy día. Por ejemplo, las normas de diseño y construcción de presas de tierra establecen que tanto la cimentación como la cortina cumplan con criterios muy precisos de control de filtraciones, presiones y estabilidad, así como medidas de seguridad hidrológica contra el desbordamiento. Sin embargo, la falla de presas de tierra no ha disminuido de forma sustancial (Singh, 1996).

Por otra parte, los efectos del cambio climático es probable que establezcan condiciones más

extremas de crecientes en las presas existentes y por ello se deben estudiar intentando modelar su falla o rompimiento, lo cual involucra dos estimaciones fundamentales: (1) el hidrograma de egresos, caracterizado por su gasto máximo, mismo que es función de la geometría de la brecha de falla y del tiempo de desarrollo de ésta; y (2) el tránsito de la onda de la creciente originada por la falla hacia aguas abajo hasta el valle y/o la planicie de inundación (Singh, 1996; Chinnarasri *et al.*, 2004).

Para estimar las magnitudes citadas, asociadas con la falla de una presa, se tienen tres enfoques de aproximación: (1) el *estadístico*, orientado al desarrollo de ecuaciones empíricas por regresión; (2) los *métodos hidráulicos*, los cuales simulan de modo numérico la formación de la brecha de falla, tomando en cuenta los mecanismos hidráulicos y de erosión del flujo; y (3) los *métodos experimentales* o de laboratorio que utilizan modelos reducidos o a escala real, y que permiten verificar ya sea los resultados de los otros dos enfoques o bien generar nuevas relaciones empíricas (Chinnarasri *et al.*, 2004; Zagonjoli, 2007).

El objetivo de este trabajo consiste en exponer las ecuaciones de regresión que se han establecido como las más confiables o de menor incertidumbre para la estimación de las características geométricas de la brecha de falla, su tiempo de formación y el gasto máximo descargado por ésta. Estas 28 ecuaciones empíricas se integran en tres grupos, según su grado de incertidumbre. Se describen dos aplicaciones numéricas hipotéticas, la primera en una presa pequeña que falla por desbordamiento y la segunda en una presa de mediana altura, cuya falla se debe a la erosión interna que generan las filtraciones (tubificación); en ambas aplicaciones se siguen dos planteamientos de análisis que son función de la información disponible. Con base en sus resultados se establecen las magnitudes buscadas asociadas con la falla o rompimiento de una presa con cortina de materiales terreos, incluyendo el intervalo de variación de tales aproximaciones.

Recopilación de ecuaciones empíricas

Información sobre fallas de presas

La cortina de una presa puede fallar de manera gradual o súbita. El tipo de falla depende en particular del material de la cortina. Por lo general, las de concreto fallan al instante, y las de tierra o de enrocamiento lo hacen de forma gradual. Las cortinas más comunes son las de materiales terrosos (homogéneas, mixtas y de enrocamiento), y sus fallas están más documentadas, con duraciones rápidas de 15 minutos a 3 horas, y con lapsos prolongados de 3 a 12 horas, y aún más (Singh, 1996).

Varios investigadores exponen en sus trabajos los archivos que emplearon para deducir sus ecuaciones empíricas propuestas, por ejemplo, Hagen (1982), MacDonald y Langridge-Monopolis (1984), Costa (1985, 1988), Froehlich (1995a, 2008), y Xu y Zhang (2009).

Dimensiones necesarias y estimaciones buscadas

De manera general, las magnitudes relativas al rompimiento o falla de una presa se pueden dividir en dos grupos: *parámetros geométricos* e *hidrográficos*. Los primeros corresponden a la brecha de falla, la cual por lo común es trapezoidal, con cinco parámetros geométricos: ancho máximo (b_M), ancho medio (b), ancho del fondo o mínimo (b_m), tirante o altura de la brecha (H_b), y taludes de sus lados (z). En la figura 1 se indican los elementos geométricos generales de una brecha de falla. Los parámetros hidrográficos son el tiempo que dura la falla (T_f) y el gasto máximo descargado (Q_p). El T_f en rompimientos por desbordamiento es el lapso desde el inicio del crecimiento rápido hacia abajo hasta que cesa la erosión lateral de la cortina (Chinnarasri *et al.*, 2004). En las fallas por erosión interna debido a filtraciones, abarca desde su inicio el colapso de la cresta de la cortina y la subsecuente formación lateral de la brecha (Xu y Zhang, 2009).

La aplicación de la mayoría de las ecuaciones empíricas requiere como datos básicos las

siguientes dos características geométricas o hidráulicas de la presa (NWS, 2002):

1. *Altura hidráulica (H_h) o altura de la cortina (H_c)*: es la distancia en metros desde el nivel del cauce en el sitio de la cortina hasta la elevación máxima del agua almacenada.
2. *Volumen de almacenamiento (V_a)*: espacio máximo para almacenamiento en m^3 en la presa bajo el nivel máximo alcanzable por el agua, incluyendo cualquier sobrealmacenamiento.

La primera definición establece que $H_h = H_c$, entonces implica tres simplificaciones: (1) que el piso o fondo de la brecha de falla alcanza el cauce, es decir, que toda la altura de cortina se erosiona; (2) que en fallas por tubificación el nivel del agua llega hasta la corona de la cortina, y (3) que en fallas por desbordamiento no se considera la lámina de agua sobre la cresta de la cortina. Cuando el fondo de la brecha de falla no llega al cauce y se conoce el *nivel real* alcanzado por el agua al inicio de la falla, se deben definir el volumen descargado (V_w) por la brecha de falla, así como el tirante de agua sobre el fondo de la brecha H_w . En la figura 1, H_f es la altura del fondo de la brecha y H_d la carga hidráulica sobre la corona.

Otra información que es necesaria para ratificar las estimaciones realizadas es: (1) la *longitud de cortina (L_c)*, la distancia horizontal total en metros medida a lo largo del eje de la cortina en su cresta, es decir, entre los confines o bordes de su corona, que permite verificar el ancho máximo (b_M) de la brecha, la cual debe ser menor que L_c ; y (2) el *volumen de la cortina (V_c)*, el cual debe ser mayor que la estimación del volumen erosionado (V_e) de material en la brecha de falla. También es necesario conocer el *tipo de cortina*, para la aplicación de las ecuaciones empíricas más recientes.

Recopilación exhaustiva y selección de ecuaciones empíricas

Una búsqueda exhaustiva en todas las referencias citadas condujo a la integración de una

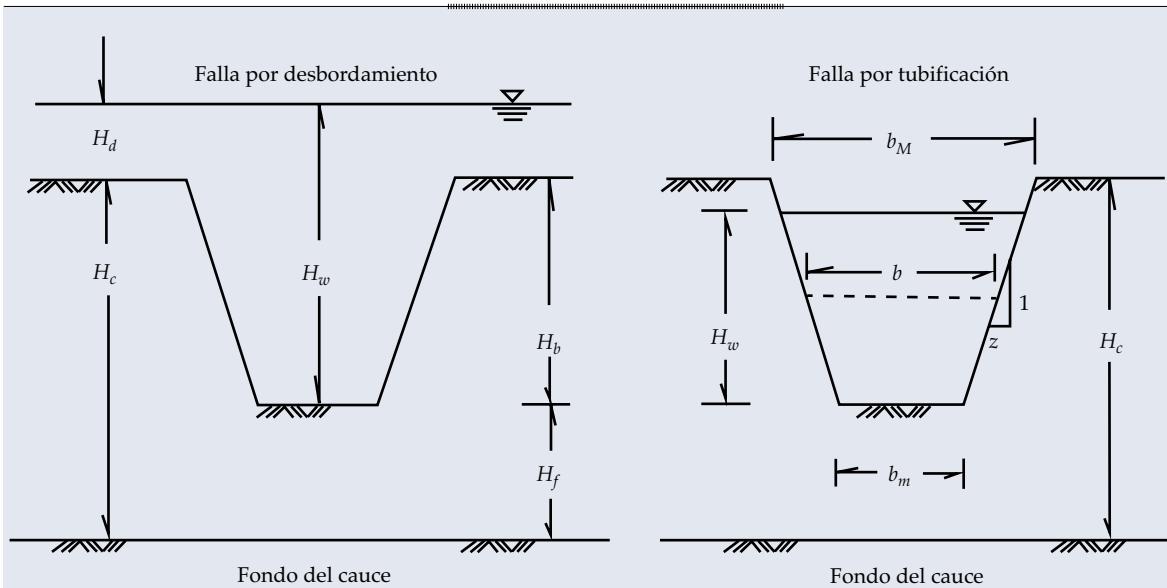


Figura 1. Elementos geométricos generales de una brecha de falla (Froelich, 2008; Xu y Zhang, 2009).

lista de 52 ecuaciones empíricas. Una primera selección consistió en eliminar las aplicables a presas naturales originadas por deslizamientos u obstrucción de ríos (Walder y O'Connor, 1997); otra eliminación se basó en la similitud de fórmulas, en relación con sus coeficientes y/o exponentes, dejando sólo las representativas de un tipo de ecuación. A continuación, con base en una muestra de presas o embalses analizados en México (Campos-Aranda, 2013), se definieron magnitudes representativas de alturas de cortina y capacidades para realizar contrastes numéricos y eliminar las fórmulas con resultados dispersos o claramente erróneos. Lo anterior condujo a seleccionar sólo 28 ecuaciones empíricas. Tales ecuaciones se exponen en seguida en orden cronológico de aparición, agrupadas en las tres estimaciones siguientes: b , T_f y Q_p .

Lista de variables utilizadas

Para facilitar la comprensión rápida de cada una de las 28 fórmulas empíricas que serán expuestas, a continuación se presenta la *lista de sus variables* involucradas.

- B_i = variable de control (i varía de 1 a 5).
- b_M = ancho máximo de la brecha de falla, en metros.
- b = ancho medio de la brecha de falla, en metros.
- b_m = ancho mínimo o del fondo de la brecha de falla, en metros.
- C_b = constante empírica, función del $V_{a'}$ adimensional.
- CI = tipo de cortina de corazón impermeable.
- Db = tipo de falla por desbordamiento.
- g = aceleración de la gravedad igual a 9.81 m/s^2 .
- H_b = altura de la brecha o profundidad desde la corona de la cortina, en metros.
- H_c = altura de la cortina, distancia desde el cauce hasta su corona, en metros.
- H_d = carga hidráulica sobre la corona de la cortina, en metros.
- H_f = altura del fondo de la brecha sobre el cauce, en metros.
- H_h = altura hidráulica, distancia del cauce a la elevación máxima del agua almacenada, en metros.
- HM = tipo de cortina homogénea o de materiales graduados (mixta).

- H_r = altura de cortina de referencia igual a 15 metros.
- H_w = tirante de agua sobre el fondo de la brecha, en metros.
- k_0, k_1 = factor por tipo de falla, adimensional.
- L_c = longitud de la cortina, medida a lo largo de su eje en su corona, en metros.
- PC = tipo de cortina de pantalla de concreto.
- Q_p = gasto máximo de descarga, en m^3/s .
- Q_p = gasto máximo de descarga, según curva envolvente, en m^3/s .
- V_a = volumen de almacenamiento o capacidad máxima de agua, con el sobre almacenamiento, en m^3 .
- V_c = volumen de la cortina, en m^3 .
- V_e = volumen de material erosionado de la cortina, en m^3 .
- V_w = volumen descargado por la brecha de falla, en m^3 .
- v_i = variable de control (i varía de 1 a 5).
- Tb = tipo de falla por tubificación.
- T_f = tiempo que dura la falla, en horas.
- T_r = tiempo de falla de referencia igual a una hora.
- z = taludes de los lados de la brecha de falla, adimensional.

Estimación del ancho de la brecha de falla

Zagonjolli (2007), para el caso de 23 presas con falla por desbordamiento y cortinas de materiales terreos (homogéneas, mixtas y de enrocamiento) con o sin revestimiento en sus taludes y valores observados de b que variaron de 5 a 170 metros, encontró que la ecuación (2) siguiente tiene un 30% menos de error medio cuadrático (EMC) que la fórmula (1) originalmente propuesta por el US Bureau of Reclamation en 1988:

$$b = 3.0 \cdot H_h \quad (1)$$

$$b = 4.6 \cdot H_h - 5.7 \quad (2)$$

Por otra parte, Von Thun y Gillette (1990), citado en NWS (2002) y por Wahl (2004), analizaron 57 fallas de presas y propusieron la fórmula:

$$b = 2.5 \cdot H_h + C_b \quad (3)$$

en la cual C_b es una constante función del volumen almacenado (V_a) en millones de m^3 (Mm^3), con los valores siguientes: 6.10 con $V_a < 1.233 \text{ Mm}^3$; 18.3 cuando V_a fluctúa entre 1.233 y 6.165 Mm^3 ; 42.7 cuando V_a varía de 6.165 a 12.330 Mm^3 , y 54.9 con $V_a > 12.330 \text{ Mm}^3$.

Reed y Halgren (2011), basándose en el análisis de incertidumbre realizado por Wahl (2004) a las ecuaciones empíricas, recomiendan las encontradas por Froehlich (1995b), para b es:

$$b = 0.1803 \cdot k_0 \cdot (H_b)^{0.190} \cdot (V_a)^{0.320} \quad (4)$$

en donde k_0 es el llamado factor por tipo de falla, con un valor de 1.40 para desbordamiento y 1.00 para tubificación. H_b es la altura o profundidad de la brecha en metros (ver figura 1).

Froehlich (2008) estableció y presenta un registro de 74 fallas de presas, los cuales incluyen 69 datos de anchos medios de la brecha. Para tales valores encontró la expresión:

$$b = 0.270 \cdot k_1 \cdot H_b^{0.040} \cdot V_w^{0.320} \quad (5)$$

en la cual b está en metros; k_1 es adimensional y vale 1.30 para fallas debidas a desbordamiento y 1.00 para los otros tipos, tubificación por ejemplo; V_w es el volumen de agua almacenado arriba del fondo de la brecha en m^3 y que por lo tanto define el hidrograma de egresos. Froehlich (2008) también especifica que el talud z (figura 1) es aproximadamente 1.00 en fallas por desbordamiento y de 0.70 en las de otros tipos.

Xu y Zhang (2009) presentan dos ecuaciones empíricas, una completa y otra simplificada, para las cinco características siguientes: H_b , $b_{M'}$, b , T_f y Q_p . Como utilizan variables adimensionales, primero se debe estimar H_b . En sus ecuaciones, $H_r = 15$ metros es la altura de referencia de las cortinas, cuyos tipos pueden ser: (1) con corazón impermeable, (2) con pantalla de concreto, y (3) homogéneas o de materiales

graduados (mixtas); además establecen como variable predictiva principal la *erosionabilidad* de la cortina, clasificándola en alta, media y baja. En algunas ecuaciones se toma en cuenta el tipo de falla: desbordamiento o erosión por filtración (tubificación). Para la obtención de sus ecuaciones empíricas siguieron un proceso de selección de variables, basado en el coeficiente de determinación ajustado. Sus primeras tres ecuaciones completas y simplificadas permiten estimar H_b , b_M y b y corresponden a los números (6), (7) y (8) para las primeras, y a los (9), (10) y (11) para las segundas, todas mostradas en el cuadro 1.

Estimación del tiempo de formación de la brecha de falla

MacDonald y Langridge-Monopolis (1984) son los primeros en proponer una relación empírica gráfica en papel logarítmico para estimar T_f en horas, en función del volumen de material erosionado (V_e) de la cortina en m^3 . Además, definen el llamado *factor de formación de la brecha* como el producto de la altura hidráulica por el volumen de agua descargado ($H_h \cdot V_w$), el cual permite estimar V_e . Wahl (2004) ha expuesto estas relaciones como ecuaciones potenciales, éstas son:

$$T_f = 0.0179 \cdot V_e^{0.364} \quad (12)$$

en la cual V_e se estima con las expresiones siguientes para cortinas de tierra homogéneas y de materiales graduados (mixtas) y de otros tipos (enrocamiento y terraplenes con pantalla de concreto o con corazón impermeable):

$$(V_e)_H = 0.0261 \cdot (H_h \cdot V_w)^{0.769} \quad (13)$$

$$(V_e)_{OT} = 0.00348 \cdot (H_h \cdot V_w)^{0.852} \quad (14)$$

Nuevamente, Reed y Halgren (2011) adoptan la fórmula propuesta por Froehlich (1995b), según resultados de Wahl (2004):

$$T_f = 0.00254 \cdot (H_b)^{-0.90} \cdot (V_w)^{0.53} \quad (15)$$

Froehlich (2008) encuentra con análisis dimensional y procesamiento de 23 datos la fórmula siguiente:

$$T_f = 0.0176 \cdot \left(\frac{V_w}{g \cdot H_b^2} \right)^{1/2} \quad (16)$$

Por último, las ecuaciones completa y simplificada que encontraron Xu y Zhang (2009) para el tiempo de falla son los números (17) y (18) del cuadro 1, cuyo T_r es de una hora.

Estimación del gasto máximo de descarga

Hagen (1982), citado por Wahl (2004) y Zagonjoli (2007), analizó 18 fallas de presas por desbordamiento y encontró que el producto de H_h por V_a o V_w , llamado *factor de presa*, se relaciona con el gasto máximo de descarga Q_p . Los gastos máximos observados variaron de 730 a 83 000 m^3/s , mientras que el factor de presa fluctuó de 2.90 a 48 000 Mm^4 . Su ecuación envolvente propuesta es:

$$Q_p = 0.5404 \cdot (H_h \cdot V_w)^{0.50} \quad (19)$$

Walder y O'Connor (1997) señalan que las llamadas *curvas envolventes* definen el límite superior del Q_p en las gráficas, que muestran su valor en función de H_h , V_w o de $(H_h \cdot V_w)$ y tienen como propósito único permitir hacer una estimación rápida y conservadora del Q_p . Las curvas envolventes no tienen significado físico y sólo han sido establecidas para mostrar los límites superiores de las observaciones históricas.

MacDonald y Langridge-Monopolis (1984) analizaron la falla de 42 presas, 30 con cortinas homogéneas, y 12 con cortinas mixtas y de enrocamiento con pantallas de concreto. La altura de ellas varió de 6 a 93 metros. Definieron dos ecuaciones de regresión entre Q_p y el factor de formación de la brecha; la segunda es la curva envolvente:

Cuadro 1. Ecuaciones empíricas propuestas por Xu y Zhang (2009) y valores de sus variables de control.

| Núm. de ecuación | Ecuaciones completas | Variables de control (v) | Tipo de cortina (v_3) | | | Tipo de falla (v_4) | | | Erosionabilidad (v_5) | | |
|--|---|------------------------------|---------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|
| | | | CI | PC | HM | Db | Tb | Alta | Media | Baja | |
| (6) | $\frac{H_b}{H_c} = 0.453 - 0.025 \cdot \left(\frac{H_c}{H_r} \right)^{0.025} + B_1$ | $B_1 = v_3 + v_4 + v_5$ | 0.145 | 0.176 | 0.132 | 0.218 | 0.236 | 0.254 | 0.168 | 0.031 | |
| (7) | $\frac{b_M}{H_b} = 1.062 \cdot \left(\frac{H_c}{H_r} \right)^{0.092} \cdot \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{0.508} \cdot \exp(B_2)$ | $B_2 = v_3 + v_4 + v_5$ | 0.061 | 0.088 | -0.089 | 0.299 | -0.239 | 0.411 | -0.062 | -0.289 | |
| (8) | $\frac{b}{H_b} = 0.787 \cdot \left(\frac{H_c}{H_r} \right)^{0.133} \cdot \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{0.652} \cdot \exp(B_3)$ | $B_3 = v_3 + v_4 + v_5$ | -0.041 | 0.026 | -0.226 | 0.149 | -0.389 | 0.291 | -0.140 | -0.391 | |
| (17) | $\frac{T_f}{T_r} = 0.304 \cdot \left(\frac{H_c}{H_r} \right)^{0.707} \cdot \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{1.228} \cdot \exp(B_4)$ | $B_4 = v_3 + v_4 + v_5$ | -0.327 | -0.674 | -0.189 | -0.579 | -0.611 | -1.205 | -0.564 | 0.579 | |
| (30) | $\frac{Q_p}{\sqrt{g \cdot V_w^{5/3}}} = 0.175 \cdot \left(\frac{H_c}{H_r} \right)^{0.199} \cdot \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{-1.274} \cdot \exp(B_5)$ | $B_5 = v_3 + v_4 + v_5$ | -0.503 | -0.591 | -0.649 | -0.705 | -1.039 | -0.007 | -0.375 | -1.362 | |
| Ecuaciones simplificadas | | | | | | | | | | | |
| (9) | $\frac{H_b}{H_c} = C_1 - 0.025 \cdot \left(\frac{H_c}{H_r} \right)$ | $C_1 = v_5$ | | | | | | | 1.072 | 0.986 | 0.858 |
| (10) | $\frac{b_M}{H_b} = 0.996 \cdot \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{0.558} \cdot \exp(C_2)$ | $C_2 = v_4 + v_5$ | | | | | | | -0.262 | 0.377 | -0.288 |
| (11) | $\frac{b}{H_b} = 5.543 \cdot \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{0.739} \cdot \exp(C_3)$ | $C_3 = v_4 + v_5$ | | | | | | | -1.207 | -1.747 | -0.613 |
| (18) | $\frac{T_f}{T_r} = C_4 \cdot \left(\frac{H_c}{H_r} \right)^{0.654} \cdot \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{1.246}$ | $C_4 = v_5$ | | | | | | | 0.038 | 0.066 | 0.205 |
| (31) | $\frac{Q_p}{\sqrt{g \cdot V_w^{5/3}}} = 0.133 \cdot \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{-1.276} \cdot \exp(C_5)$ | $C_5 = v_4 + v_5$ | | | | | | | -0.788 | -1.232 | -0.498 |
| Simbología: | | | | | | | | | | | |
| CI = corazón impermeable. PC = pantalla de concreto; HM = homogénea o de materiales graduados (mixta); Db = desbordamiento; Tb = tubificación. | | | | | | | | | | | |

$$Q_p = 1.154 \cdot (H_h \cdot V_w)^{0.412} \quad (20)$$

$$Qp = 3.850 \cdot (H_h \cdot V_w)^{0.411} \quad (21)$$

Costa (1985), también citado por Wahl (2004) y Zagonjolli (2007), analizó 31 fallas históricas de presas, cuya altura varió de 1.8 a 83.8 metros y volumen de almacenamiento al tiempo de la falla, fluctuando de 3 800 m³ a 700 Mm³. No se hizo distinción en el modo de falla ni en el tipo de cortina. Sus dos ecuaciones de menor incertidumbre según el estudio de Wahl (2004) son:

$$Qp = 2.634 \cdot (H_h \cdot V_w)^{0.440} \quad (22)$$

$$Q_p = 0.981 \cdot (H_h \cdot V_w)^{0.420} \quad (23)$$

Zagonjolli (2007) encontró gráficamente que no existen diferencias significativas entre las ecuaciones (20) y (23). Froehlich (1995a,b) estudió 22 fallas históricas de presas, cuyas alturas fluctuaron de 3.7 a 86.9 metros; sus volúmenes V_w variaron de 92 500 m³ a 660 Mm³. La fórmula encontrada es:

$$Q_p = 0.607 \cdot (H_w)^{1.240} \cdot (V_w)^{0.295} \quad (24)$$

Froehlich (1995a) cita como referencia histórica la fórmula propuesta por el US Soil Conservation Service en 1985 para cortinas de materiales terreos y valores de H_h mayores de 31.4 metros:

$$Q_p = 16.60 \cdot (H_h)^{1.85} \quad (25)$$

Walder y O'Connor (1997) tratan el tema de las *presas naturales*, es decir, las formadas por los procesos que originan un almacenamiento de agua al obstruir un cauce; los más comunes son los deslizamientos de ladera y los flujos con escombros (tallos y ramas). Estos autores presentan tres ecuaciones de regresión y

sus respectivas curvas envolventes para presas originadas por obstrucción y para las construidas *ex professo*. Para las presas construidas sus fórmulas son:

$$Q_p = 2.50 \cdot (H_h)^{2.340} \quad (26)$$

$$Q_p = 1.16 \cdot (V_w)^{0.460} \quad (27)$$

$$Q_p = 0.61 \cdot (H_h \cdot V_w)^{0.430} \quad (28)$$

$$Qp = 2.90 \cdot (H_h \cdot V_w)^{0.430} \quad (29)$$

Walder y O'Connor (1997) indican que sus fórmulas están basadas en los datos recolectados por Costa (1988). Estos autores señalan que probablemente las estimaciones del Q_p obtenidas con las ecuaciones de regresión sean menores que el gasto real descargado por la brecha de falla debido a que muchas mediciones se realizaron aguas abajo de la presa y tales valores no fueron corregidos por traslación y atenuación de la onda de la creciente. Esto último también justifica el uso de las curvas envolventes para acotar el valor del Q_p . Las últimas dos ecuaciones de Xu y Zhang (2009) completa y simplificada son las números (30) y (31) del cuadro 1 y permiten la estimación de Q_p .

Factores de mayor influencia en las estimaciones

En la mayoría de las ecuaciones simplificadas encontradas por Xu y Zhang (2009), el factor más importante que influye en la estimación es la erosibilidad de la cortina. Una erosibilidad alta permite un desarrollo rápido de la brecha de falla, lo cual conduce a dimensiones mayores de ésta, a un gasto máximo de descarga más elevado y un

tiempo de formación más breve. También se observa que el llamado *cociente de forma del almacenamiento* ($V_w^{1/3} / H_w$) tiene un papel preponderante en todas sus ecuaciones, excepto en las dos primeras, que estiman la profundidad de la brecha (H_b).

En relación con el cociente de forma del almacenamiento existen dos tipos de presas o embalses: la llamadas *bajas* con altura reducida de cortina y gran almacenamiento, es decir, embalses de planicie, que conduce a valores de $V_w^{1/3} / H_w$ grandes; y las presas *altas* con una altura considerable de cortina y volumen de almacenamiento reducido, esto es, embalses encañonados, que originan magnitudes de $V_w^{1/3} / H_w$ pequeñas. Entonces, para dos presas con el mismo volumen de almacenamiento, pero una alta y otra baja, la primera generará un gasto de descarga mayor debido a la mayor energía potencial, pues como se observa en las ecuaciones (30) y (31), el gasto Q_p decrece conforme $V_w^{1/3} / H_w$ se incrementa. T_f decrece con el incremento de Q_p y aumenta conforme $V_w^{1/3} / H_w$ se acrecienta (ver ecuaciones (17) y (18)).

Varios investigadores han encontrado que el gasto máximo puede ocurrir antes de que el ancho de la brecha de falla sea máximo. Xu y Zhang (2009) indican que en presas altas es muy probable que el gasto máximo de descarga ocurra antes que en las presas bajas y que en estas últimas el ancho de la brecha de falla será mayor debido a que la erosión lateral continúa con un nivel en el embalse relativamente alto.

También se ha encontrado que las fallas por desbordamiento originan anchos de brecha mayores que los rompimientos por erosión debida a filtraciones (tubificación); es probable que lo anterior esté asociado principalmente a que las fallas por desbordamiento se originan por lo común por crecientes que aportan grandes volúmenes de agua al embalse, los cuales elevan su nivel más allá de la corona de la cortina, aumentando su cociente $V_w^{1/3} / H_w$; por el contrario, en las fallas por tubificación se libera agua del embalse y los niveles en el

almacenamiento son menores tanto en el inicio del proceso como después del colapso del túnel de erosión para formar la brecha de falla.

Intervalos de incertidumbre asociados con varias ecuaciones empíricas

En el cuadro 2 se presentan las estimaciones de Wahl (2004) relativas a la incertidumbre de 11 de las 28 ecuaciones empíricas seleccionadas. Se indica el error medio de la estimación en ciclos logarítmicos (\bar{e}), el ancho de la banda de incertidumbre ($\pm 2S_e$), también en ciclos logarítmicos, siendo S_e la desviación estándar de los errores y el intervalo de variación de la estimación o intervalo de confianza (I. de C.), los cuales corresponden a $10^{\bar{e}-2S_e}$ y a $10^{\bar{e}+2S_e}$, mismos que al ser multiplicados por el valor obtenido con la ecuación empírica respectiva definen aproximadamente la banda de confianza al 95%. Para las 10 ecuaciones empíricas propuestas por Xu y Zhang (2009) se exponen en el cuadro 2, en sus dos últimas columnas, sólo los intervalos de variación establecidos por tales autores.

Agrupamiento de las ecuaciones empíricas

Se integraron tres grupos con las 28 ecuaciones empíricas que son aplicables a presas construidas, por requerir sólo información de altura del nivel del agua en el almacenamiento y volumen del mismo antes de la falla. El primer grupo lo forman siete ecuaciones seleccionadas que no fueron contrastadas por Wahl (2004) y que por lo tanto no tienen intervalos de confianza para sus estimaciones; el segundo grupo de 11 ecuaciones son las reportadas en el cuadro 2 y que fueron estudiadas por Wahl (2004). El último grupo lo constituyen las 10 ecuaciones empíricas encontradas por Xu y Zhang (2000), consideradas como las más confiables debido a la información que incorporan en las variables de control (B_i y C_i del cuadro 1) sobre la erosionabilidad de la cortina y su tipo, así como por su forma de romperse o fallar.

Cuadro 2. Estimaciones de la incertidumbre de las ecuaciones empíricas indicadas, según Wahl (2004), y Xu y Zhang (2009).

| Número de ecuación (variable por estimar) | \bar{e} | $\pm 2S_e$ | Intervalo de confianza al 95% | Número de ecuación (variable por estimar) | Intervalo de confianza al 95% |
|---|-----------|------------|-------------------------------|---|-------------------------------|
| (4) (b) | +0.01 | ± 0.39 | 0.40-2.40 | (6) y (9) ($H_b < 50$ m) | 0.79-1.20 |
| (3) (b) | +0.09 | ± 0.35 | 0.37-1.80 | (6) y (9) ($H_b > 50$ m) | 0.74-1.25 |
| (12) (T_f) | -0.21 | ± 0.83 | 0.24-11.0 | (7) (b_M) | 0.44-2.27 |
| (15) (T_f) | -0.22 | ± 0.64 | 0.38-7.30 | (10) (b_M) | 0.45-2.22 |
| (24) (Q_p) | -0.04 | ± 0.32 | 0.53-2.30 | (8) (b) | 0.43-2.36 |
| (23) (Q_p) | -0.05 | ± 0.72 | 0.17-4.70 | (11) (b) | 0.44-2.30 |
| (25) (Q_p) | +0.13 | ± 0.50 | 0.23-2.40 | (17) (T_f) | 0.30-3.35 |
| (20) (Q_p) | +0.13 | ± 0.70 | 0.15-3.70 | (18) (T_f) | 0.34-2.97 |
| (19) (Q_p) | +0.43 | ± 0.75 | 0.07-2.10 | (32) (Q_p) | 0.30-3.35 |
| (21) (Q_p) | +0.64 | ± 0.70 | 0.05-1.10 | (33) (Q_p) | 0.33-3.02 |
| (22) (Q_p) | +0.64 | ± 0.72 | 0.04-1.22 | - | - |

Aplicaciones numéricas

Casos hipotéticos establecidos y sus resultados

Para ilustrar los resultados de las 18 ecuaciones empíricas que son aplicables cuando sólo existe la información básica que se ha citado (H_c y V_a), se han formulado dos aplicaciones numéricas hipotéticas. La primera corresponde a una presa relativamente pequeña, con altura de cortina (H_c) de 13 metros, altura del agua a nivel de conservación (NAN) de 10 metros y cuya falla por desbordamiento originó un tirante de agua sobre la corona de 1 metro, entonces H_w es de 14 metros, ya que se supone que la brecha de falla llegó al desplante de la cortina, en el nivel del cauce. El volumen almacenado a nivel de conservación (V_a) es de 15 Mm³ y al inicio de la falla (V_w) de 30 Mm³. La cortina es homogénea de material arcilloso, que puede ser considerado fácilmente erosionable.

La segunda aplicación es la relativa a una falla por tubificación en una presa de mediana altura, cuyos datos son: $H_c = 45$ m, $H_w = 35$ m, altura del NAN = 40 m, $V_a = 140$ Mm³ y $V_w = 80$ Mm³. Su cortina tiene corazón impermeable y puede ser considerada resistente a la erosión (erosionabilidad media).

En la primera aplicación se emplean $k_0 = 1.40$ y $k_1 = 1.30$, en las ecuaciones (4) y (5); el tipo de cortina es H para estimar el volumen erosionado con la expresión (13) y se usan las expresiones (12), (15) y (16) para estimar el T_f . Se proponen dos análisis: el primero utilizando los datos fácilmente disponibles de la presa, es decir, altura del NAN y volumen de conservación, por lo cual $H_h = 10$ metros y $V_w = 15$ Mm³. En el segundo análisis se emplea el nivel antes de la falla y el volumen almacenado respectivo, entonces $H_h = H_w = 14$ metros y $V_w = 30$ Mm³. Los resultados de la aplicación de las 18 ecuaciones empíricas en cada análisis se muestran en el cuadro 3, así como los valores adoptados en cada uno.

Para la segunda aplicación se tiene que $k_0 = k_1 = 1.00$; en las ecuaciones (4) y (5), el tipo de cortina es OT para estimar el volumen erosionado con la expresión (14) y se usan las expresiones (12), (15) y (16) para estimar el T_f . De nuevo se proponen dos análisis: el primero utilizando los datos fácilmente disponibles de la presa, es decir, altura del NAN y volumen de conservación, por lo cual $H_h = 40$ metros y $V_w = 140$ Mm³; en el segundo análisis se emplea el nivel antes de la falla y el volumen almacenado respectivo, entonces $H_h = H_w = 35$ metros y $V_w = 80$ Mm³. Los resultados de la aplicación de las 18 ecuaciones

Cuadro 3. Resultados de las 18 ecuaciones empíricas indicadas, en la primera aplicación numérica:
falla por desbordamiento y cortina homogénea erosionable.

| Primer análisis: $H_h = 10.0 \text{ m}$ y $V_w = 15.0 \text{ Mm}^3$ | | | Segundo análisis: $H_h = 14.0 \text{ m}$ y $V_w = 30.0 \text{ Mm}^3$ | | |
|--|---|---------------------------|---|---|---------------------------|
| Número de ecuación | Magnitud estimada | Intervalo de confianza | Número de ecuación: | Magnitud estimada | Intervalo de confianza |
| (4) | $b = 77.4$ | 30.9-185.6 | (4) | $b = 102.9$ | 41.2-247.0 |
| (3) | $b = 79.9$ | 29.6-143.8 | (3) | $b = 89.9$ | 33.3-161.8 |
| (2) | $b = 40.3$ | | (2) | $b = 58.7$ | |
| (5) | $b = 76.1$ | | (5) | $b = 96.3$ | |
| | $b_{\text{adop}} = 75.0 \text{ m}$ | | | $b_{\text{adop}} = 95.0 \text{ m}$ | |
| (13) | $V_e = 50\ 589$ | | (13) | $V_e = 111\ 665$ | |
| (12) | $T_f = 0.92$ | 0.22-10.15 | (12) | $T_f = 1.23$ | 0.30-13.54 |
| (15) | $T_f = 2.03$ | 0.77-14.84 | (15) | $T_f = 2.17$ | 0.82-15.83 |
| (16) | $T_f = 2.18$ | | (16) | $T_f = 2.20$ | |
| | $(T_f)_{\text{adop}} = 1.75 \text{ h}$ | | | $(T_f)_{\text{adop}} = 2.00 \text{ h}$ | |
| (24) | $Q_p = 1\ 381$ | 732-3 176 | (24) | $Q_p = 2\ 571$ | 1 363-5 914 |
| (23) | $Q_p = 2\ 665$ | 453-12 524 | (23) | $Q_p = 4\ 106$ | 698-19 299 |
| (25) | $Q_p = 1\ 175$ | 270-2 821 | (25) | $Q_p = 2\ 190$ | 504-5 256 |
| (20) | $Q_p = 2\ 696$ | 404-9 976 | (20) | $Q_p = 4\ 121$ | 618-15 247 |
| (19) | $Qp = 6\ 619$ | 463-13 899 | (19) | $Qp = 11\ 075$ | 775-23 257 |
| (21) | $Qp = 8827$ | 441-9 710 | (21) | $Qp = 13\ 478$ | 674-14 826 |
| (22) | $Qp = 10\ 425$ | 417-12 719 | (22) | $Qp = 16\ 400$ | 656-20 008 |
| (26) | $Q_p = 547$ | | (26) | $Q_p = 1\ 202$ | |
| (27) | $Q_p = 2\ 320$ | | (27) | $Q_p = 3\ 191$ | |
| (28) | $Q_p = 2\ 000$ | | (28) | $Q_p = 3\ 114$ | |
| (29) | $Qp = 9\ 509$ | | (29) | $Qp = 14\ 805$ | |
| | $(Q_p)_{\text{adop}} = 2\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$ | 425-6 500 | | $(Q_p)_{\text{adop}} = 3\ 500 \text{ m}^3/\text{s}$ | 650-10 000 |
| | $(Qp)_{\text{adop}} = 10\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$ | 450-12 000 | | $(Qp)_{\text{adop}} = 15\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$ | 700-20 000 |

empíricas en cada análisis se muestran en el cuadro 5, así como los valores adoptados en cada uno.

En los cuadros 4 y 6 se exponen los resultados de la aplicación de las ecuaciones completas y simplificadas de Xu y Zhang (2009) para la primera y segunda aplicaciones numéricas.

Análisis de los resultados

En relación con los resultados concentrados en los cuadros 3 a 6, correspondientes a las dos aplicaciones numéricas planteadas y sus respectivos enfoques de uso de la información disponible, es destacable que todos ellos

muestran una similitud en órdenes de magnitud, en particular las estimaciones del ancho de la brecha y del gasto máximo de descarga. Considerando que las estimaciones mostradas en los cuadros 4 y 6 son las más confiables, es importante citar que el uso de las 18 ecuaciones empíricas seleccionadas conduce a valores de b y T_f aproximados en la primera aplicación, no así con su Q_p ; lo contrario ocurre en la segunda aplicación numérica.

Respecto a los resultados de las ecuaciones completa y simplificada de Xu y Zhang (2009), mostrados en los cuadros 4 y 6 para cada aplicación numérica, se observa para la primera el efecto de la erosionabilidad alta, la

Cuadro 4. Estimación de las magnitudes asociadas con el rompimiento de una presa con cortina homogénea de tierra, de alta erosionabilidad y falla por desbordamiento, con las ecuaciones de Xu y Zhang (2009).

| Datos generales: $H_c = 13.0$ m; $H_w = 14$ m; $V_w = 30.0$ Mm ³ | | | | | |
|---|----------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------|
| Ecuación completa | | | Ecuación simplificada | | |
| Número de ecuación | Magnitud estimada | Intervalo de confianza | Número de ecuación | Magnitud estimada | Intervalo de confianza |
| (6) | $H_b = 13.5$ m | 10.6-16.2 | (9) | $H_b = 13.7$ m | 10.8-16.4 |
| (7) | $b_M = 126.7$ m | 55.8-287.7 | (10) | $b_M = 144.7$ m | 65.1-321.2 |
| (8) | $b = 97.1$ m | 41.8-229.2 | (11) | $b = 121.1$ m | 53.3-278.6 |
| (17) | $T_f = 1.72$ h | 0.52-5.76 | (18) | $T_f = 1.65$ h | 0.56-4.90 |
| (30) | $Q_p = 4\ 483$ m ³ /s | 1 345-15 018 | (31) | $Q_p = 5\ 653$ m ³ /s | 1 865-17 071 |

Cuadro 5. Resultados de las 18 ecuaciones empíricas indicadas en la segunda aplicación numérica: falla por tubificación y cortina resistente a la erosión.

| Primer análisis: $H_h = 40.0$ m y $V_w = 140.0$ Mm ³ | | | Segundo análisis: $H_h = 35.0$ m y $V_w = 80.0$ Mm ³ | | |
|--|--|------------------------|--|--|------------------------|
| Número de ecuación | Magnitud estimada | Intervalo de confianza | Número de ecuación | Magnitud estimada | Intervalo de confianza |
| (4) | $b = 146.9$ | 58.8-352.7 | (4) | $b = 119.8$ | 47.9-287.5 |
| (3) | $b = 154.9$ | 57.3-278.8 | (3) | $b = 142.4$ | 52.7-256.3 |
| (2) | $b = 178.3$ | | (2) | $b = 155.3$ | |
| (5) | $b = 126.5$ | | (5) | $b = 105.2$ | |
| | $b_{adop} = 150.0$ m | | | $b_{adop} = 130.0$ m | |
| (14) | $V_e = 703\ 130$ | | (14) | $V_e = 389\ 545$ | |
| (12) | $T_f = 2.41$ | 0.58-26.46 | (12) | $T_f = 1.94$ | 0.47-21.34 |
| (15) | $T_f = 1.91$ | 0.72-13.92 | (15) | $T_f = 1.60$ | 0.61-11.67 |
| (16) | $T_f = 1.66$ | | (16) | $T_f = 1.44$ | |
| | $(T_f)_{adop} = 2.00$ h | | | $(T_f)_{adop} = 1.65$ h | |
| (24) | $Q_p = 14\ 889$ | 7 891-34 244 | (24) | $Q_p = 10\ 697$ | 5 669-24 602 |
| (23) | $Q_p = 12\ 187$ | 2 072-57 280 | (23) | $Q_p = 9\ 109$ | 1 549-42 813 |
| (25) | $Q_p = 15\ 273$ | 3 513-36 655 | (25) | $Q_p = 11\ 930$ | 2 744-28 632 |
| (20) | $Q_p = 11\ 980$ | 1 797-44 326 | (20) | $Q_p = 9\ 004$ | 1 351-33 314 |
| (19) | $Qp = 40\ 440$ | 2 831-84 924 | (19) | $Qp = 28\ 595$ | 2 002-60 050 |
| (21) | $Qp = 39\ 081$ | 1 954-42 989 | (21) | $Qp = 29\ 393$ | 1 470-32 332 |
| (22) | $Qp = 51\ 265$ | 2 051-62 543 | (22) | $Qp = 37\ 789$ | 1 512-46 103 |
| (26) | $Q_p = 14\ 020$ | | (26) | $Q_p = 10\ 258$ | |
| (27) | $Q_p = 6\ 482$ | | (27) | $Q_p = 5\ 011$ | |
| (28) | $Q_p = 9\ 485$ | | (28) | $Q_p = 7\ 041$ | |
| (29) | $Qp = 45\ 094$ | | (29) | $Qp = 33\ 472$ | |
| | $(Q_p)_{adop} = 13\ 500$ m ³ /s | 2 500-40 000 | | $(Q_p)_{adop} = 10\ 000$ m ³ /s | 2 000-30 000 |
| | $(Qp)_{adop} = 45\ 000$ m ³ /s | 2 250-62 000 | | $(Qp)_{adop} = 35\ 000$ m ³ /s | 1 500-45 000 |

Cuadro 6. Estimación de las magnitudes asociadas con el rompimiento de una presa con cortina de enrocamiento con corazón impermeable, de erosionabilidad media y falla por tubificación, con las ecuaciones de Xu y Zhang (2009).

| Datos generales: $H_c = 45.0 \text{ m}$; $H_w = 35 \text{ m}$; $V_w = 80.0 \text{ Mm}^3$ | | | | | |
|--|--------------------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Ecuación completa | | | Ecuación simplificada | | |
| Número de ecuación | Magnitud estimada | Intervalo de confianza | Número de ecuación | Magnitud estimada | Intervalo de confianza |
| (6) | $H_b = 41.7 \text{ m}$ | 33.0-50.1 | (9) | $H_b = 41.0 \text{ m}$ | 32.4-49.2 |
| (7) | $b_M = 138.0 \text{ m}$ | 60.7-313.2 | (10) | $b_M = 116.3 \text{ m}$ | 52.3-258.1 |
| (8) | $b = 110.4 \text{ m}$ | 47.5-260.5 | (11) | $b = 86.6 \text{ m}$ | 38.1-199.1 |
| (17) | $T_f = 3.21 \text{ h}$ | 0.96-10.75 | (18) | $T_f = 3.09 \text{ h}$ | 1.05-9.18 |
| (30) | $Q_p = 15\,794 \text{ m}^3/\text{s}$ | 4\,738-52\,909 | (31) | $Q_p = 11\,571 \text{ m}^3/\text{s}$ | 3\,819-34\,946 |

cual conduce a estimaciones mayores en b y Q_p . Lo inverso ocurre en la segunda aplicación numérica, quizás debido a la erosionabilidad media.

Conclusiones

Primera: la selección expuesta de ecuaciones empíricas que permiten estimar las magnitudes asociadas con la falla de una presa por rompimiento de su cortina de materiales terreos, es decir, el ancho medio de brecha (b) en metros, el tiempo de formación de ésta (T_f) en horas y el gasto máximo descargado (Q_p) en m^3/s , constituye una primera aproximación en los estudios de seguridad de presas o embalses, encaminados a definir los planes de emergencia y las estrategias de mitigación de riesgos en las áreas localizadas aguas abajo de éstas.

Segunda: a juzgar por los resultados concentrados en los cuadros 3 a 6, para las dos aplicaciones numéricas formuladas, éstos permiten establecer los valores probables de las magnitudes b , T_f y Q_p , así como sus intervalos de variación; con base en tales estimaciones, se pueden plantear los *análisis de sensibilidad* que deberán ser abordados con los modelos hidráulicos de estimación del hidrograma de egresos y su tránsito respectivo hacia aguas abajo, para definir gastos, niveles y tiempo de llegada de la inundación que se estima, originada por rompimiento o falla de una presa con cortina de tierra o de enrocamiento.

Tercera: en el proceso de selección de resultados se deben tener en cuenta las dos siguientes recomendaciones: (1) se considera que las 10 ecuaciones empíricas desarrolladas por Xu y Zhang (2009), mostradas en el cuadro 1, son las más confiables, debido a que fueron generadas con un proceso de selección de regresores e incorporan en sus variables de control (v_i) información relevante sobre la cortina, su tipo de falla y la erosionabilidad estimada; (2) del resto de las 18 ecuaciones empíricas, tienen mayor confiabilidad las 11 que presentan intervalos de variación, pues fueron las que mostraron menor incertidumbre de acuerdo con el trabajo de Wahl (2004).

Agradecimientos

Se agradece al ingeniero Rodrigo Murillo Fernández, subgerente de Seguridad de Presas de la Comisión Nacional del Agua, su comunicación personal con el autor, la cual ayudó a formular la primera aplicación numérica hipotética.

Recibido: 03/09/12

Aceptado: 07/08/13

Referencias

CAMPOS-ARANDA, D.F. Modelado empírico simple del rompimiento de presas pequeñas de tierra (hidrograma de salidas). *Ingeniería. Investigación y Tecnología*. Vol. XIV, núm. 3, julio-septiembre de 2013, pp. 377-388.

- COSTA, J.E. *Floods from Dam Failures*. Open-File Report 85-560. Denver: US Geological Survey, 1985, 54 pp.
- COSTA, J.E. Floods from Dam Failures. In *Flood Geomorphology*. Baker, V.R., Kochel, R.C., and Patton, P.C. (editors). New York: John Wiley, 1988, pp. 439-463.
- CHINNARASRI, C.H., JIRAKITLERD, S., and WONGWISES, S. Embankment Dam Breach and Its Outflow Characteristics. *Civil Engineering and Environmental Systems*. Vol. 21, No. 4, 2004, pp. 247-264.
- FROEHLICH, D.C. Peak Outflow from Breached Embankment Dam. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 121, No. 1, January / February, 1995a, pp. 90-97.
- FROEHLICH, D.C. Embankment Dam Breach Parameters Revisited. *Proceedings of the First International Conference on Water Resources Engineering*, San Antonio, Texas, August 14-18, 1995b. New York: ASCE, pp. 887-891.
- FROEHLICH, D.C. Embankment Dam Breach Parameters and their Uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 134, No. 12, December, 2008, pp. 1708-1721.
- HAGEN, V.K. Re-evaluation of Design Floods and Dam Safety. *Proceedings of the 14th Congress of International Commission on Large Dams*. Vol. 1. Río de Janeiro, Brasil, 1982, pp. 475-491.
- MacDONALD, T.C. and LANGRIDGE-MONOPOLIS, J. Breaching Characteristics of Dam Failure. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 110, No. 5, May, 1984, pp. 567-586.
- NWS. *Dambreak Scenario Rules of Thumb used at LMRFC*. National Weather Service, 2002. Consultado en agosto de 2012. World Wide Web: www.nws.noaa.gov/.../dambeak_rules_of_thumb_v2.30.doc.
- REED, S. and HALGREN, J. Validation of a New GIS Tool to Rapidly Develop Simplified Dam Break Models. *Proceedings of Association of Dam Safety Officials Dam Safety*. Washington, DC, Sept. 25-29, 2011, 18 pp.
- SINGH, V.P. *Dam Breach Modeling Technology*. Chapter 2: Dam Breaching. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996, pp. 27-40.
- VON THUN, J.L. and GUILLETTE, D.R. *Guidance on Breach Parameters*. Unpublished internal document. Denver: US Bureau of Reclamation, 1990, 17 pp.
- WAHL, T.L. Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 130, No. 5, May, 2004, pp. 389-397.
- WALDER, J.S. and O'CONNOR, J.E. Methods for Predicting Peak Discharge of Floods Caused by Failure of Natural and Constructed Earthen Dams. *Water Resources Research*. Vol. 33, No. 10, October 1997, pp. 2337-2348.
- XU, Y. and ZHANG, L.M. Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 135, No. 12, December, 2009, pp. 1957-1970.
- ZAGONJOLLI, M. *Dam Break Modeling, Risk Assessment and Uncertainty Analysis for Flood Mitigation*. London: Taylor & Francis Group, 2007, 140 pp.

Dirección institucional del autor

Dr. Daniel Francisco Campos Aranda

Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Genaro Codina 240, Colonia Jardines del Estadio
78280 San Luis Potosí, San Luis Potosí, México
campos_aranda@hotmail.com