

Mejoras de eficiencia hidráulica en vertedores con canal de descarga libre en presas: propuesta metodológica

• Mauro Iñiguez-Covarrubias • Waldo Ojeda-Bustamante* •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*Autor de correspondencia

• Carlos Díaz-Delgado •
Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México

Resumen

Iñiguez-Covarrubias, M., Ojeda-Bustamante, W., & Díaz-Delgado, C. (enero-febrero, 2015). Mejoras de eficiencia hidráulica en vertedores con canal de descarga libre en presas: propuesta metodológica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 69-79.

En México, la infraestructura hidráulica está avejentada y en muchos casos urge rehabilitarla. Esta tarea requiere la aplicación de nuevos métodos de rediseño tanto hidráulico como hidrológico y en lo posible acorde con los desarrollos tecnológicos actuales. Una obra de infraestructura hidráulica utilizada en embalses son los vertedores con canal de descarga libre, generalmente ubicada en canales muy anchos o con cargas hidráulicas altas, características de importancia vital al determinar la altura de la cortina. Se presenta una propuesta de alternativa de diseño y de mejoras de la eficiencia hidráulica, al sustituir la estructura del cimacio por un vertedor tipo laberinto. Esta propuesta adopta las bases del diseño de vertedores de "pico de pato". Como caso de estudio, se aplicó para el vertedor de la presa "El Ejidatario", ubicada en Sombrerete, Zacatecas, México. Los resultados muestran que con la instalación del vertedor "pico de pato" se aumentó la longitud de vertido 5.67 veces en relación con la proporcionada con el cimacio; asimismo, se reduce la carga vertedora en 62.5%, al pasar de una carga de 80 a 30 cm y se incrementa en un 12% la capacidad del embalse con la misma altura del NAME. Además, se comparó la eficiencia hidráulica del "pico de pato" respecto al vertedor "tecla de piano" para la misma longitud de vertido y condiciones de instalación, siendo mayor en 208%. Se recomienda en la instalación del nuevo vertedor utilizar el mismo sitio del cimacio, sólo adecuando la entrada al tanque amortiguador y conservando la salida del canal de descarga. Se concluye recomendar un vertedor "pico de pato" en donde las condiciones físicas o de estudio se requiera, ya que al aumentar la eficiencia hidráulica del vertedor para este caso, aumenta la capacidad del embalse y, por lo tanto, la vida de servicio.

Palabras clave: vertedor "pico de pato", vertedores de descarga libre, seguridad en presas.

Abstract

Iñiguez-Covarrubias, M., Ojeda-Bustamante, W., & Díaz-Delgado, C. (January-February, 2015). Improvements in the Hydraulic Efficiency of Weirs with Free Outfalls in Dams. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(1), 69-79.

Hydraulic infrastructure in Mexico is aging and in many cases there is an urgent need for rehabilitation. This task requires the application of new hydraulic as well as hydrological design methods that are consistent with current technological developments, to the extent possible. Free weirs are hydraulic infrastructures used in reservoirs and are generally located in very wide channels or those with high hydraulic loads, characteristics which are vitally important to determine the height of a dam wall. A proposal is presented for an alternative design and to improve hydraulic efficiency by substituting the free weir with a labyrinth weir. This proposal is based on the duckbill weir design. A case study was conducted in the "El Ejidatario" dam located in Sombrerete, Zacatecas, Mexico. The results show that with the installation of a labyrinth weir the length increased to 5.67 times that of the free weir. In addition, with a change in load from 80 to 30 cm the weir load decreased 62.5% and the capacity of the reservoir increased 12% with the same mean elevation. The hydraulic efficiency of the duckbill weir was compared to that of the piano key weir for the same weir length and installation conditions, resulting in a 208% improvement. It is recommended to install the new weir in the same site as the free weir, only adapting the entrance to the stilling basin while using the same outlet to the discharge channel. A labyrinth weir is recommended when physical or study conditions require it, since in this case by increasing the hydraulic efficiency of the weir the capacity of the reservoir will increase and, thus, the service life.

Keywords: Labyrinth weir, duckbill weir, free outflow weirs, dam safety.

Recibido: 06/02/13
Aceptado: 11/09/14

Introducción

En México, la infraestructura hidráulica está avejentada y en muchos casos urge rehabilitarla. Esta tarea requiere la aplicación de nuevos métodos de diseño tanto hidráulico como hidrológico y en lo posible de acuerdo con los actuales desarrollos tecnológicos. Hoy en día, la infraestructura hidráulica en los distritos y unidades de riego en México es conservada, operada y administrada por usuarios y la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Entre estas tareas, la mayor cantidad del recurso económico invertido es destinado a rubros administrativos, asignando pocos recursos para la conservación de dicha infraestructura (IMTA, 2007). La infraestructura hidroagrícola incluye la obra de cabeza (embalse), red mayor, red menor, caminos y red de drenaje, dejando lastimosamente en el olvido las obras de excedencias o vertedores en particular.

Una obra de infraestructura hidráulica utilizada en embalses son los vertedores con canal de descarga libre, generalmente ubicados en canales de descarga muy anchos o con cargas hidráulicas altas, características de importancia vital al determinar la altura de la cortina (SARH, 1973; Arreguín, 2000; CFE, 1981). Para el diseño de vertedores de descarga libre se utiliza la metodología propuesta por USDI (1979), con bases teóricas de la mecánica de fluidos, expuestas por Chow (1959), Henderson (1966), Levi (1567), y Levi y Aldama (1979), entre otros. Estas estructuras, instaladas en un importante número de embalses de México, sobre todo en presas de materiales graduados, han resultado costosas, pues requieren, por la relación longitud de vertido-carga hidráulica sobre el vertedor, de un canal muy ancho para tirantes pequeños o tirantes altos con longitudes pequeñas de vertedor, lo que implica mayor altura de la cortina. Sin embargo, se subraya que son de fácil operación, ya que su funcionamiento no requiere de equipo ni mano de obra.

En los distritos y unidades de riego en México, los diseños modernos de la infraestructura

incluyen métodos de control del flujo de agua y de operación, para ello se utilizan las estructuras de control de nivel con el fin de no variar la extracción del gasto en las tomas. La metodología de diseño aplicada se basa principalmente en los trabajos de Hay y Taylor (1970). Estos autores presentan un método general de diseño derivado de trabajos experimentales sobre el funcionamiento hidráulico de vertedores tipo laberinto. El funcionamiento de los vertedores de cresta larga consiste en incrementar la descarga por unidad de ancho de la estructura para un nivel fijo de operación sobre la cresta vertedora. En la figura 1 se muestra planta y perfil de una sección de un canal donde se ubica un vertedor de cresta larga. En esta figura, L_n es el ancho del espejo del agua a la altura de la cresta; H , la carga hidráulica sobre el vertedor; W_v , la altura del vertedor.

El diseño del vertedor de cresta larga consiste en determinar la longitud de la cresta vertedora, de manera que las variaciones del nivel del agua sobre el vertedor se mantengan dentro de un rango máximo para la operación. Hay y Taylor (1970) definen un método que requiere la estimación de un parámetro denominado Wr ; los autores reportan los valores de W_r (cuadro 1) obtenidos de manera experimental, haciendo variar la relación H/W_n contra la relación Q_n/Q_d donde Q_n es el gasto de diseño del vertedor en laberinto y Q_d es el gasto que pasa por el vertedor normal $Q_d = C_d * L * H^{(3/2)}$, $L = L_n - 0.2H$ y C_d = coeficiente de descarga del vertedor normal; además, W_r es variable en la relación para la determinación de la longitud de la cresta vertedora (L_e), la cual se determina con la ecuación (1):

$$L_e = L_n \left(\frac{C_s}{C_d} \right) W_r \quad (1)$$

Donde L_e = longitud efectiva; C_s = coeficiente de descarga del vertedor de cresta larga, el ángulo α del vertedor es la inclinación del vertedor con respecto al eje longitudinal del canal (figura 1) y se determina con $\alpha = 0.75 \arcsen(L_n/L_e)$.

El número de ciclos del vertedor se establece usando los modelos de la figura 2. Para

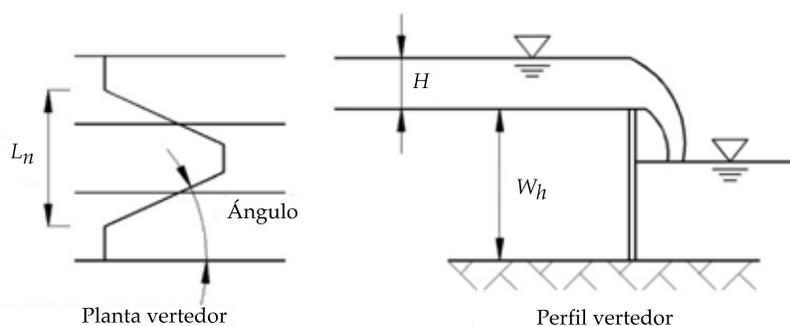


Figura 1. Planta y perfil del vertedor de cresta larga.

Cuadro 1. Valores de W_h (Hay & Taylor, 1970).

Relación de Q_u/Q_d	Relación de H/W_h				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	2.00	2.00	2.00	2.10	2.20
3	3.00	3.05	3.15	3.33	3.50
4	4.00	4.10	4.33	4.65	5.90
5	5.05	5.26	5.77	7.99	-
6	6.09	6.71	8.20	-	-
7	7.22	8.10	-	-	-
8	8.30	-	-	-	-

el uso del representativo se entra con las relaciones: L_c/L_n indicado con un asterisco; L_n/W_h , indicado con dos asteriscos, y el ángulo α indicado con tres asteriscos; además, cada modelo se indica con el número situado en la parte superior. Hay y Taylor (1970) presentan más ampliamente los pasos uno a uno en la determinación de su propuesta, la cual utiliza, entre otros, Walker (1987).

Ribeiro *et al.* (2012) han propuesto un tipo de estructuras vertedoras de descarga libre utilizadas en presas de almacenamiento, al que denominan vertedores “tecla de piano”. Este tipo de vertedor es parecido en la forma a un vertedor “pico de pato” de sección rectangular, tal como se muestra en la figura 3. Ribeiro *et al.* (2012) comentan que para el diseño del vertedor no se tomaron en cuenta los estudios reportados por Hay y Taylor (1970).

En la figura 3 se muestra la vista en planta y perfil del vertedor “tecla de piano”. En este

tipo de vertedor, la sección “B” interior no es de descarga libre y la sección de salida “A” no es de pared vertical. En el cuadro 2 se presentan las características generales de los vertedores de “tecla de piano”, sólo que para esta revisión se divide en tres partes: gasto entrada a la llave, gasto lateral de la llave y gasto salida de la llave.

En el cuadro 2 se incluyen las ecuaciones del cálculo de gasto por separado, según tres tipos de vertedores, los cuales se unen al hacer el vertedor “tecla de piano”. El coeficiente de descarga de acuerdo con Sotelo-Ávila (1979) es mayor para un vertedor cuando se tienen menos obstáculos por vencer, esto significa que el mayor coeficiente de descarga para un vertedor es cuando se tiene la descarga libre y sin contracciones laterales.

De acuerdo con Ribeiro *et al.* (2012), el gasto del vertedor “tecla de piano” es función de los parámetros que se anotan en la ecuación (2):

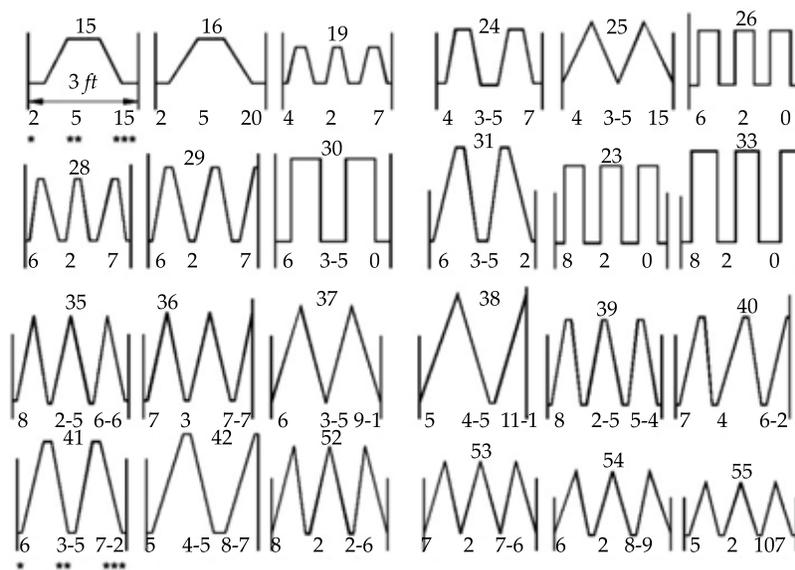


Figura 2. Modelos de los vertedores de cresta larga reportados por Hay y Taylor (1970).

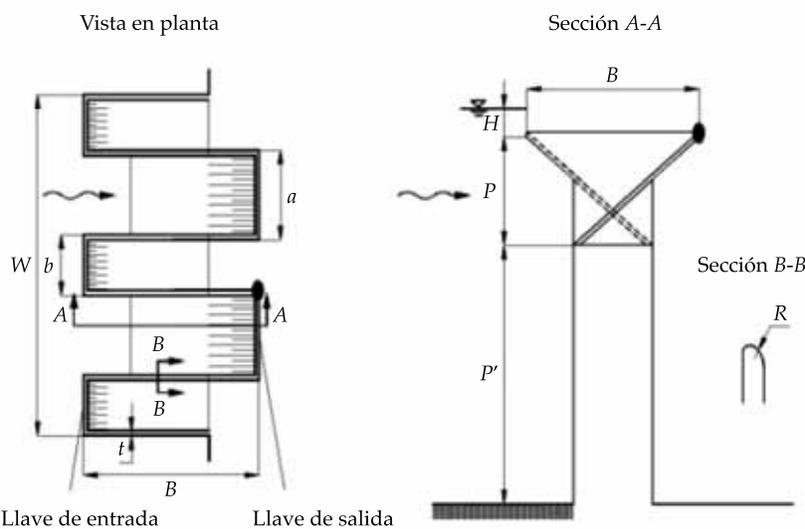


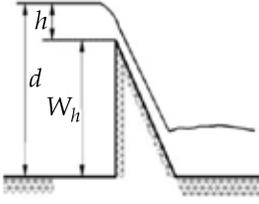
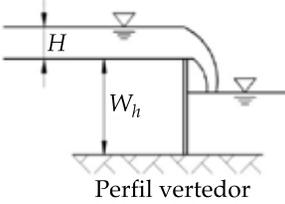
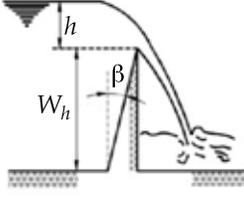
Figura 3. Planta y perfil del vertedor "tecla de piano" (Ribeiro et al., 2012).

$$Q_{PWK} = f(\rho, g, \nu, \sigma, H, L, P, P', W, a, b, S_{\text{entrada}}, S_{\text{salida}}, \alpha, t, R) \quad (2)$$

Donde ρ = densidad del agua; g = aceleración de gravedad; ν = viscosidad dinámica; σ = tensión superficial; H = carga hidráulica sobre el

vertedor; L = longitud del vertedor; P = altura del vertedor "tecla de piano"; P' = altura de piso a nivel de inicio del vertedor; W = ancho de la cresta vertedora; a = ancho exterior de la tecla; b = ancho interior de la tecla; S_{entrada} = pendiente de entrada; S_{salida} = pendiente de salida; α = ángulo entre la entrada y salida;

Cuadro 2. Valores de Q para tres tipos de vertedores.

Gasto entrada a la llave	Gasto lateral de la llave	Gasto salida de la llave
		
$Q = CLh^{3/5} \left(1 + 0.787C^2 \frac{h^2}{d^2} \right)$	$Q = \frac{2}{3} C \sqrt{2g} LH^3$	$Q = \frac{2}{3} C \alpha \sqrt{2g} LH^3$

t = espesor de la pared vertedora; R = radio de la cresta vertedora.

La metodología reportada por Ribeiro *et al.* (2012) para el diseño del vertedor está basada en resultados de investigaciones realizadas con modelos a escala. De los resultados experimentales se determinaron las relaciones H/a vs. r , y H/P vs. r , para diferentes valores de L/W .

Con base en lo anteriormente presentado, los desafíos para los investigadores relacionados con el diseño de infraestructura hidráulica es desarrollar nuevos y más eficientes métodos de diseño, en lo posible de acuerdo con los más recientes desarrollos tecnológicos. Por ello, en este trabajo se presenta una propuesta original alternativa de diseño de vertedores. En específico, se propone sustituir la estructura de vertedores con canal de descarga libre en presas de almacenamiento por un vertedor de control del tipo laberinto, con el fin de realizar mejoras en la eficiencia hidráulica en vertedor con canal de descarga libre en presas y al mismo tiempo aumentar la capacidad de almacenamiento con la misma elevación de la cota del NAME e incrementar la vida útil del embalse.

Materiales y métodos

Para el estudio del caso se expone el embalse “El Ejidatario”, localizado en el ejido Felipe Ángeles del municipio de Sombrerete, en el estado de Zacatecas, México (figura 4). Las coordenadas geográficas son latitud norte 23°

34' 30'' y longitud oeste 103° 33' 30'', y se tiene una elevación de 2 217.97 msnm (Colegio de Postgraduados, 1977).

El área de la cuenca comprende una superficie de 50 km²; la precipitación media anual es de 500 mm; se estimó un escurrimiento medio anual de 4.5 hm³; el embalse cuenta con una capacidad de almacenamiento útil de 1.25 hm³, y abastece una área de riego de 150 hectáreas (Colegio de Postgraduados, 1977). En la margen izquierda se ubica el vertedor de demasías tipo “cimacio de descarga libre”, con capacidad de verter una avenida máxima de 35 m³/s; el canal de llamada y el canal de descarga no están revestidos, por estar alojados sobre roca riolítica (Colegio de Postgraduados, 1977).

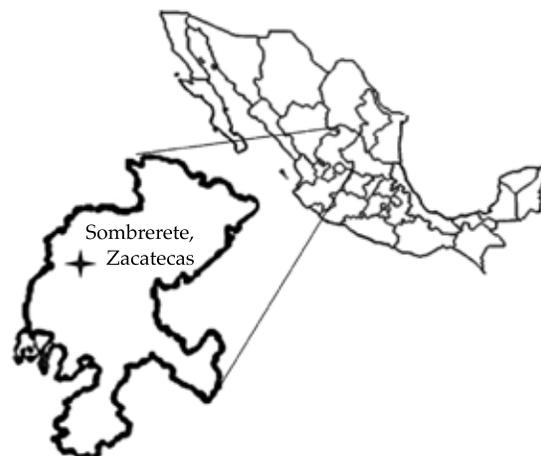


Figura 4. Mapa de localización, estado de Zacatecas, México.

La obra vertedora es una estructura llamada vertedor con canal de descarga libre (Arreguín & Alcocer, 2011), que consta de canal de acceso, cresta vertedora, tanque amortiguador o dissipador de energía, y canal de descarga. La cresta vertedora está formada por un cimacio que adopta la forma del flujo del agua al caer y se conoce como perfil Creager; el canal de acceso tiene una base del canal de llamada y salida con anchura de 25.0 m, taludes del canal de $k = 0:1$ y está alojada al inicio en el canal de acceso en la cota nivel de rasante = 2 212.70 msnm. En la figura 5 se observa el canal de acceso al vertedor, la ubicación del cimacio y la descarga del vertedor con curvas de nivel.

La propuesta inicia con proponer la metodología realizada por Hay y Taylor (1970) en el diseño de vertedores "pico de pato". Esta metodología no permite diseños para más de tres ciclos, por lo que para este caso de estudio, por ser secciones muy extensas, se propone separar en unidades el ancho de la cresta y el gasto, al dividir por el mismo denominador y con ello realizar diseños por unidad separada, como cuerpos independientes, y una vez ya diseñadas, unir esas partes en la resultante integral. Esta estructura es necesario acoplarla en el canal de llamada, estructura vertedora, dissipador de energía y el canal de descarga.

El diseño y la ubicación de vertedores de cresta larga tipo "pico de pato" se realiza en tres pasos. Paso uno: se divide el ancho del canal y gasto entre siete estructuras, siendo la unidad: $Q_n =$ gasto de diseño = $5 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) base = 3.57 m; (k) talud = 0:1; (m) pendiente = 0.0008; (n) Manning = 0.017; (Y_n) tirante normal = 1.091 m; (Y_c) tirante crítico = 0.585 m. Es importante señalar que la carga real sobre el vertedor es considerada de 0.30 m, la cual es la carga máxima tolerante de acuerdo con la altura del vertedor.

Paso dos: diseño del vertedor como tipo "pico de pato". Con base en el método propuesto por Hay y Taylor (1970), se diseña el vertedor. Los datos de entrada son (W_h) altura del vertedor = 1.0 m; (h) carga sobre el vertedor = 0.3 m. Las dimensiones obtenidas del vertedor "pico de pato" son longitud efectiva del vertedor = 20.21 m; ángulo (alfa) = 7.63° ; (W_r) coeficiente de eficiencia = 4.58; $L_e =$ longitud efectiva = $L_n - 0.2H = 3.57 - 0.2 * 0.3 = 3.51$; $C_d = 1.778 + (H/W_h) = 1.778 + (0.3/1.0) = 2.078$; $Q_d = C_d * L * H^{(3/2)} = 2.078 * 3.51 * (0.3)^{(3/2)} = 1.19 \text{ m}^3/\text{s}$; la relación gastos de $Q_{pp}/Q_d = 5.0/1.19 = 4.17$; (a) ancho de los picos = 0.13 m. Como resultado se elige el modelo 31 de dos ciclos (figura 2); se muestra en la figura 6.

Paso tres: al final del diseño de la estructura terminal se procede a la unión de los diseños

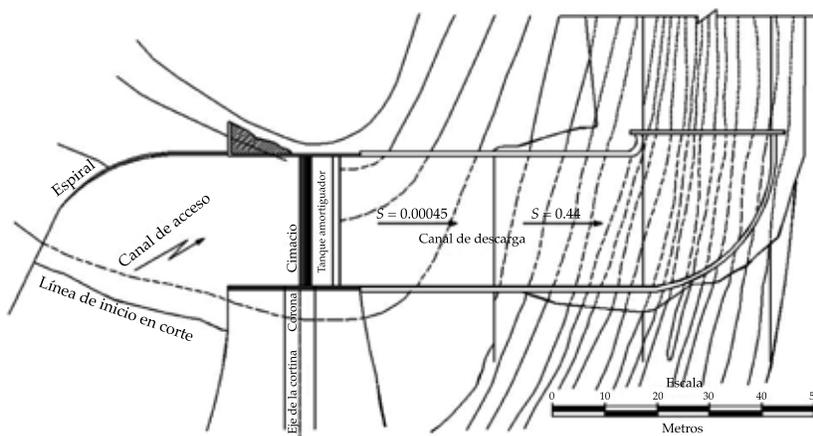


Figura 5. Vista en planta de la estructura vertedora.

unitarios del vertedor. La figura 7 muestra las características generales de los vertedores de cresta larga propuestos para instalarse sobre el canal principal margen derecha, base = 25 m, longitud total, $L = 141.47$ m, completando 14 ciclos en toda estructura vertedora (siete unidades con dos ciclos por unidad). Se instala el vertedor, se adecua con la estructura disipadora de energía y se procede a la elaboración de planos.

La propuesta continúa al proponer la metodología realizada por Ribeiro *et al.* (2012) en el diseño de vertedores “tecla de piano”; también se propone separar en unidades el ancho de la cresta y el gasto, al dividir por el mismo denominador, y con ello realizar diseños por unidad separada, como cuerpos independientes, y una vez ya diseñadas unir esas unidades en la resultante integral. Esta estructura también es necesario acoplarla en el canal de llamada, estructura vertedora, disipador de energía y el canal de descarga.

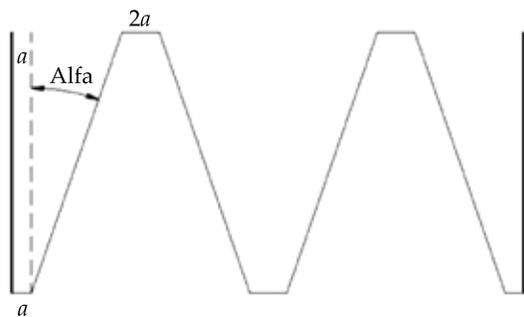


Figura 6. Planta del vertedor “pico de pato”, resultado de Hay y Taylor (1970).



Figura 7. Unión de todos los diseños parciales del vertedor en una sola estructura “pico de pato”.

El diseño y la ubicación de vertedores de cresta larga tipo “tecla de piano” se adaptó a realizarse en tres pasos. Paso uno: se divide el ancho del canal y gasto entre siete estructuras, siendo la unidad $Qn = \text{gasto de diseño} = 5 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) base = 3.57 m. Es importante señalar que la carga real sobre el vertedor es considerada $H = 0.30$ m, la cual es la carga máxima tolerante de acuerdo con la altura del vertedor, con las características consideradas para el dimensionamiento del vertedor “pico de pato”, longitud efectiva del vertedor = 20.21 m.

Paso dos: en esta etapa se procede a la revisión del diseño del vertedor tipo “tecla de piano” con base en la metodología propuesta por Ribeiro *et al.* (2012). El diseño, según los autores, considera los datos de (H) altura de la carga hidráulica sobre el vertedor = 0.3 m; longitud interior del vertedor (para este caso, a igual que b) $a = 0.89$, $b = 0.89$ m, y altura del vertedor $P = 1.0$. Con la relación $a/b = 1.0$ siempre mayor que uno, y $P/a = 1.0/0.89 = 1.12$ también siempre mayor que uno. Con el apoyo de la figura 8 y $H/P = 0.3/1.0 = 0.3$, que en correspondencia con la relación L/W , se obtiene r relación de entre caudales, $r = Q_{TP}/Q_d = 2.0$ (figura 8), con el modelo B2.

En cuanto a las dimensiones presentadas ($a = 0.89$ m, $b = 0.89$ y la relación $a/b = 1.0$) y por ser la forma en “tecla de piano”, se escoge de la figura 2 el modelo 30, que corresponde en conjunto a la longitud de 20.21; este resultado se muestra representado en la figura 9.

Paso tres: esta etapa consiste en unir todos los picos en una sola estructura; es decir, se procede a la unión de los diseños parciales

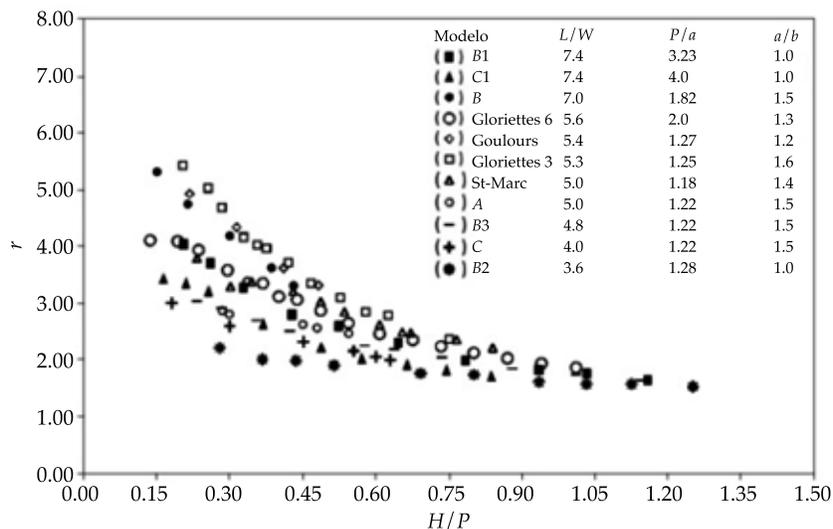


Figura 8. Relación H/P vs. r.

del vertedor “tecla de piano”. En la figura 10 se presentan las características generales de los vertedores de cresta larga propuestos para instalarse sobre el canal principal margen derecha, base = 25 m; longitud total, $L = 141.47$ m, completando siete unidades con dos ciclos cada unidad, con lo cual se tienen 14 teclas. Se instala el vertedor con la estructura disipadora de energía y se procede a la elaboración de planos.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos muestran que los dos diseños tienen la misma base del canal, $B = 25$ metros; la longitud de la nueva cresta vertedora es mayor en 5.67 veces con respecto a la del vertedor con canal de descarga libre, al pasar de una longitud de 25 metros a la nueva longitud total de cresta igual a $L = 141.47$ metros, completando 14 ciclos en toda la estructura vertedora.

Con los resultados obtenidos se observa que para los vertedores “tecla de piano”, cuando la relación longitud de la cresta vertedora y ancho del canal (L/W) aumenta y la relación a/b es mayor que 1, el vertedor se asemeja al vertedor “pico de pato”; el aumento del valor de r sólo depende de la elevación P ; para este ejercicio, $P = 1.0$ metros.

El vertedor “tecla de piano” tiene una relación de gastos $r = 2.0$, por lo que sólo puede verter un gasto de $Q_{TP} = 2 * 1.19 \text{ m}^3/\text{s} = 2.38 \text{ m}^3/\text{s}$. Lo anterior se debe a una mayor pérdida de carga hidráulica a la entrada y salida de la tecla, ya que no son consideradas de descarga libre, evidenciando que el vertedor con mayor coeficiente de descarga es el vertedor de des-

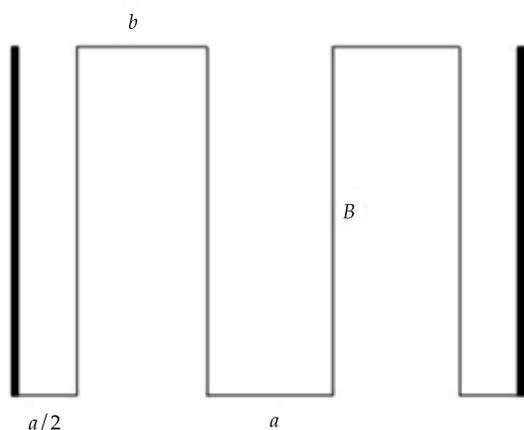


Figura 9. Planta del vertedor “pico de pato”, modelo 30.

carga libre (Anderson & Tullis, 2012). Lo anterior implica un aumento en la eficiencia del vertedor. Esto se logra con aumentar la altura P , tal como se observa en los modelos de la figura 8, con la misma longitud de cresta vertedora; es interesante anotar el cómo aumenta la eficiencia del vertedor “tecla de piano”, al incrementar la altura del cimacio, entidad que en este caso no se puede incrementar.

Con el vertedor “pico de pato”, la relación de eficiencia de caudales es $Q_n/Q_d=5.0/1.19=4.17$; es decir, 208% mayor que el determinado con “tecla de piano”. Es importante señalar que ha sido necesario fraccionar el ancho en el diseño del “pico de pato”, ya que las recomendaciones de diseño sólo permiten tener una estructura con no más de tres picos para aplicar las metodologías aquí propuestas.

Los resultados obtenidos muestran que con las alternativas de diseño analizadas se ha

logrado una reducción de la carga vertedora en 62.5%, al pasar de una carga hidráulica de 80 a 30 cm, al pasar de la elevación de la cresta vertedora anterior 2 213.20 msnm a la nueva elevación 2 213.70 msnm, respetando la elevación de 2 214.0 msnm del NAME y al mismo tiempo se ha incrementado en 12% la capacidad de almacenamiento. En la figura 11 se muestra el gráfico elevaciones-áreas-capacidades del vaso.

En la figura 12 se muestra el perfil longitudinal de la estructura vertedora “pico de pato”, instalada con adaptaciones al eliminar el cimacio, pero conservando la misma estructura disipadora de energía, respetando los niveles de salida del canal de descarga, siendo recomendado en el mismo sitio del vertedor y por lo tanto en muy reducido costo adicional a la obra; entre otros, se muestra la elevación del bordo = 2 215.5 msnm.

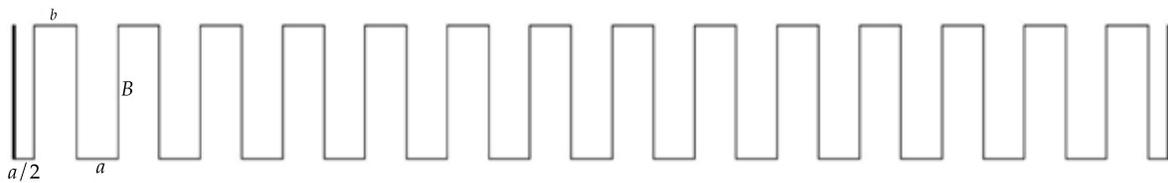


Figura 10. Unión de todos los picos en una sola estructura “tecla de piano”.

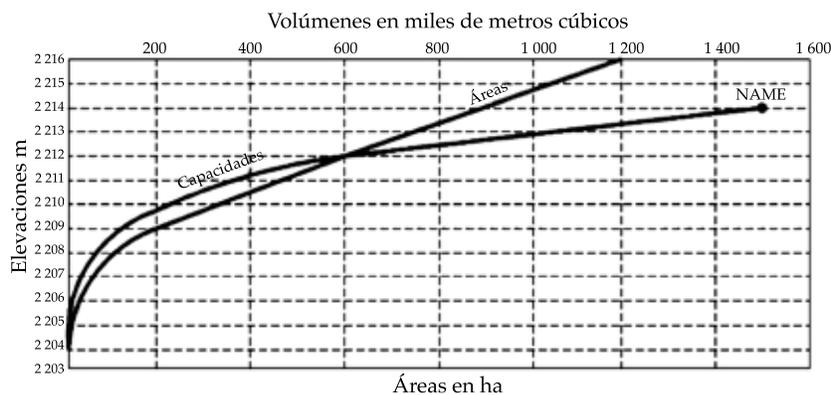


Figura 11. Curva elevaciones-áreas-capacidades.

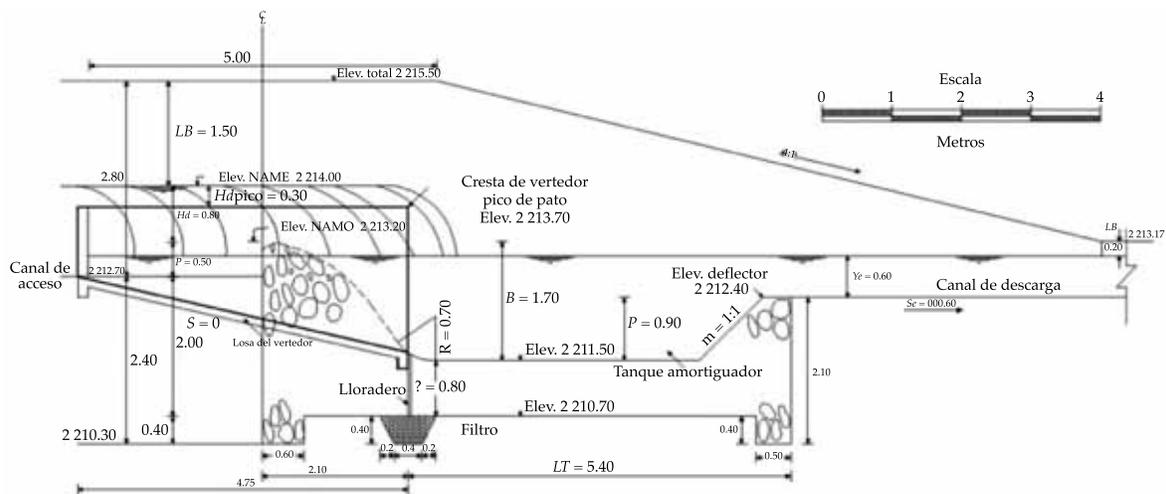


Figura 12. Perfil longitudinal de la estructura vertedora adaptada.

Conclusiones y recomendaciones

Con base en el desarrollo metodológico aquí presentado es posible recomendar la sustitución del cimacio de un vertedor de descarga libre por un vertedor del tipo “pico de pato” en presas de almacenamiento donde sea necesario y las condiciones físicas lo permitan. En efecto, con esta nueva configuración de la obra de vertido de demasías se reduce la carga hidráulica sobre el vertedor para el gasto de diseño, se incrementa de manera significativa la capacidad de almacenamiento y, por lo tanto, en este caso se alarga la vida útil del embalse.

De igual forma se recomienda el empleo de las propuestas de diseño alternativas aquí presentadas, primero considerando la metodología propuesta por Hay y Taylor (1970); para este caso, la eficiencia es mayor en más de 200%. Es importante señalar que los dos métodos de diseño analizados son aplicables, siempre y cuando se respeten las condiciones en que fueron investigados. Sin embargo, el método de Ribeiro *et al.* (2012) para una misma longitud de cresta vertedora que el “pico de pato” necesita una altura mayor de la variable P ; difícil cumplir este requisito en el caso presentado. La metodología alter-

nativa presentada aquí facilita el diseño y la reingeniería en vertedores con canal de descarga libre en presas con infraestructura existente, así como en el diseño de nuevos vertedores en presas de almacenamiento, pero con mayor eficiencia hidráulica. Finalmente se subraya que los diseños obtenidos con la aplicación de esta metodología mantienen las características de una fácil operación y sin requerimientos de equipo ni mano de obra.

Referencias

- Anderson, R. M., & Tullis, B. P. (April 1, 2012). Comparison of Piano Key and Rectangular Labyrinth Weir Hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(4), 358-361.
- Arreguín, F. (2000). *Obras de excedencia* (262 pp.). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Arreguín, F., & Alcocer, V. (2011). *Diseño hidráulico de vertedores* (244 pp.). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- CFE (1981). *Obras de excedencia* (134 pp.). Colección Manual de Diseño de Obras Civiles. México, DF: Comisión Federal de Electricidad.
- Chow, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics* (680 pp.). New York: McGraw-Hill.
- Colegio de Postgraduados (1977). *Manual para proyectos de pequeñas obras hidráulicas para riego y abrevadero* (247 pp.). México, DF: SARH.

- Henderson, F. M. (1966). *Open Channel Flow* (522 pp.). New York: MacMillan.
- IMTA (2007). *Plan director DR 087 Rosario Mezquite, Yurécuaro Michoacán* (456 pp.). Proyecto CNA-IMTA, enero-diciembre. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Levi, E. (1957). *Mecánica de los fluidos* (p. 266). México, DF: UNAM, Instituto de Ingeniería.
- Levi, E. & Aldama, A. A. (1979). *Diseño hidrodinámico y automatización fluidica en obras hidráulicas* (170 pp.). México, DF: UNAM, Instituto de Ingeniería.
- Hay, N., & Taylor, G. (November, 1970). Performance and Design of Labyrinth Weir. *Journal of the Hydraulics Division*, 96, No HY11, 2337-2357.
- Ribeiro, L., Bieri, M., Boillat, L., Schleiss, J., Singhal, G., & Sharma, N. (February 1, 2012). Discharge Capacity of Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2), 199-203.
- SARH (1973). *Proyecto de zonas de riego* (567 pp.). México, DF: Dirección de Proyectos de Irrigación, Departamento de Canales,
- Sotelo-Ávila, G. (1979). *Hidráulica general* (560 pp.). México, DF: Limusa.
- USDI (1979) *Diseño de presas pequeñas* (639 pp.). México, DF: CECSA, U.S. Department of Interior.

- Walker, R. E. (1987). Long Crested Weirs. Planning, Operation, Rehabilitation and Automation of Irrigation Water Delivery Systems (344 pp.). *Symposium Proceedings*, New York, ASCE.

Dirección institucional de los autores

Dr. Mauro Iñiguez-Covarrubias
Dr. Waldo Ojeda-Bustamante

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8535 Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
mic@tlaloc.imta.mx
wojeda@tlaloc.imta.mx

Dr. Carlos Díaz-Delgado

Centro Interamericano de Recursos del Agua
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de México
Cerro de Coatepec s/n
50130 Toluca, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (722) 2965 550
Fax: +52 (722) 2965 551
cdiazd@uaemex.mx