

**Comparación de la disipación de energía en aguas
abajo de aliviaderos escalonados y desconcertados
de vertederos de tecla de piano**

**Comparison of energy dissipation in downstream of
stepped and baffled spillways of piano key weirs**

Seyed Mehdi Naghib Zadeh^{1,2}, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3282-8174>

Mohammad Heidarnejad², ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7306-3614>

Alireza Masjedi³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2953-3519>

Amirabbas Kamanbedast⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1351-8944>

Amin Bordbar⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7632-5766>

¹Departamento de Ingeniería en Ciencias del Agua, Rama de Ciencia e Investigación de Khouzestan, Universidad Islámica de Azad, Ahvaz, Irán, mh_naghibzadeh@yahoo.com

²Departamento de Ingeniería de Ciencias del Agua, Rama Ahvaz, Universidad Islámica Azad, Ahvaz, Irán, mo_he3197@yahoo.com

³Departamento de Ingeniería de Ciencias del Agua, Rama Ahvaz, Universidad Islámica Azad, Ahvaz, Irán, drmasjedi.2007@yahoo.com

⁴Departamento de Ingeniería de Ciencias del Agua, Rama Ahvaz, Universidad Islámica Azad, Ahvaz, Irán, ka57_amir@yahoo.com

⁵Departamento de Ingeniería de Ciencias del Agua, Rama Ahvaz, Universidad Islámica Azad, Ahvaz, Irán, asefmn@yahoo.com

Autor para correspondencia: Mohammad Heidarnejad,
mo_he3197@yahoo.com

Resumen

Las fuertes lluvias estacionales sobre un embalse de la presa pueden provocar grandes inundaciones y la consiguiente falla de la estructura de la presa. Una forma de controlar los efectos adversos de las lluvias torrenciales es usar presas con dimensiones más grandes, como el vertedero de tecla de piano (PKW, por sus siglas en inglés). A pesar de aumentar los costos generales del proyecto, tales vertederos son preferidos por su alta capacidad de alcantarilla. Los PKW pueden causar daños a la presa al crear chorros de agua abajo. En el presente estudio se ha hecho un esfuerzo para examinar la disipación de energía debido a la instalación de escalones y deflectores con diferentes tamaños en vertederos de teclas de piano. Los resultados han mostrado que pequeños deflectores y grandes escalones causan pérdidas de energía máximas de 80 a 85% en los vertederos estudiados, respectivamente. También se ha descubierto que la disipación de energía del vertedero estaba relacionada de manera inversa con su ángulo de inclinación (el ángulo entre la salida del vertedero y la pared vertical de los escalones/deflectores). Otros hallazgos son: (1) aumentar la velocidad de flujo redujo el efecto de los pasos en la pérdida de energía; (2) el número de Weber ha sido

directamente proporcional a la pérdida de energía; y (3) la relación yc/H (profundidad crítica de la relación de la cabeza del vertedero) fue directamente proporcional a la pérdida de energía.

Palabras clave: vertedero de tecla de piano, disipación de energía, vertedero escalonado, número de Weber.

Abstract

Heavy seasonal rains over a dam reservoir can lead to huge floods and consequent failure of the dam structure. One way of controlling the adverse effects of heavy rains is to use weirs with larger dimensions such as piano key weirs (PKWs). In spite of raising the overall costs of the project, these weirs are preferred due to their high culvert capacity. PKWs can cause damage to the dam by creating water jets downstream. An effort was made in the present study to examine the energy dissipation due to installation of steps and baffles with different sizes on piano key weirs. The results showed that small baffles and large steps caused maximum energy losses of 85 and 80 percent in the studied weirs respectively. It was also found that the weir energy dissipation over the spillway was inversely related to its slope angle (the angle between the weir outlet and the vertical wall of the steps/baffles). The other findings were: (1) increasing the flow rate reduced the effect of the steps on the energy loss; (2) the Weber number was directly proportional to the energy loss; and (3) the ratio yc/H (critical depth to the weir head ratio) was directly proportional to the energy loss.

Keywords: Piano key weir, energy dissipation, stepped weir, Weber number.

Recibido: 17/11/2018

Aceptado: 02/10/2019

Introducción

Las actividades humanas destructivas en los últimos años han resultado en cambios climáticos severos, así como fuertes lluvias sobre los embalses de las presas (Beniston *et al.*, 2007). Lluvias con esas características aumentan con rapidez el volumen de agua en el embalse de la presa, lo que eventualmente conduce a la hidrodemolición de la presa. Según la investigación realizada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), el 36% de las represas existentes no son seguras; 80% de ellas es insegura debido a la baja capacidad de alcantarillado de sus presas (Suprpto, 2013). Debido a los riesgos catastróficos que plantea este problema a la vida humana, los ingenieros han prestado especial atención al aumento de la capacidad de alcantarilla de los vertederos, lo cual se logra en la mayoría de los casos ampliando las dimensiones de los mismos (ASDSO, 2012). No obstante, esta solución no siempre es efectiva, debido a limitaciones como espacio insuficiente en la presa y altos costos. Así, los investigadores han tratado de aumentar la eficiencia de los vertederos de presas modificando su estructura (Tiwaria & Sharmam, 2015). El vertedero de tecla de piano (PKW por sus siglas en inglés) es una de esas soluciones (Figura 1). Con un

ancho igual al de un vertedero lineal, el PKW puede producir un producto de mayor longitud y coeficiente de descarga (CdL) a un Cd más bajo (Ecuación (1)), acrecentando con ello su eficiencia hidráulica de 3 a 4 veces, en comparación con el vertedero lineal (Tiwaria & Sharmam, 2015):

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2gH_t^3} \quad (1)$$

Figura 1. Parámetros principales en un vertedero de tecla de piano (PKW).

En la Ecuación (1), Q es el caudal; Cd , el coeficiente de descarga; L , la longitud de la cresta desarrollada, y H_t es la altura total del vertedero (suma de la altura de la velocidad y la altura estática) (Tullis, Young, & Chandler, 2007). Debido a esta ventaja, el PKW ha recibido atención generalizada de investigadores en los últimos años y se han llevado a cabo diversas investigaciones acerca de este tipo de vertedero (Ribeiro, Pfister, & Schleiss, 2013) (Tabla 1).

Tabla 1. Lista de las características del PKW.

BT	Longitud total
B	Longitud base

Bo	Longitud de la cresta del voladizo aguas arriba (tecla de salida)
Bi	Aguas abajo (llave de entrada), longitud de la cresta del voladizo
P	Altura de la entrada de entrada medida desde la cresta PKW
Wi	Ancho de la llave de entrada (pared lateral a pared lateral)
Wo	Ancho de la llave de salida (pared lateral a pared lateral)

En un PKW, la disipación de energía es causada por el aumento de la carga de agua en la sección aguas arriba de la presa, así como por la formación de regiones de vórtice debido al flujo que impacta las paredes del vertedero (en particular en las partes inferiores) (Kabiri-Samani & Javaheri, 2012).

El PKW fue propuesto por primera vez por Lempérière y Ouamane (2003). En su estudio mostraron que hay dos flujos dominantes en el PKW y que se clasifica como un vertedero curvo multipropósito. En el primer modelo, la llave de entrada atrae los flujos cercanos y luego los descarga (a través de la precipitación) sobre la cresta de entrada a la sección aguas abajo (similar a un vertedero de cresta afilada con un cuerpo inclinado) (Lempérière, 2017). En el segundo modelo, el flujo se descarga en la sección aguas abajo de la pendiente clave, al pasar sobre la cresta de salida (Lempérière, 2017). Sin embargo, debido a que el chorro daña la estructura aguas abajo, se requieren medidas que incluyan aumentar el espesor de la pared y construir cuencas en la sección aguas abajo para mantener la estabilidad de la estructura. A pesar de sus altos costos iniciales, los vertederos escalonados pueden reducir la

disipación de energía en el vertedero, reduciendo los costos generales de construcción (Chanson, 2001). El efecto de disipación de energía de los escalones disminuye la profundidad, longitud y grosor de la pared lateral de la cuenca aguas abajo, lo que conlleva a una sustancial baja de costos de construcción (Chanson, 2001). Por su parte, Dermawan y Legono (2011) examinaron la energía residual y disipación de energía relativa en un vertedero escalonado modelo (pendiente = 45° ; altura = 100 cm; ancho = 30 cm). En su prueba, que comprende cinco pasos, colocaron 2, 4, 8, 16 y 32 pasos entre la cresta del vertedero y su dedo del pie, y midieron cinco flujos diferentes (entre 1.73 y 6.15 l/s) para cada paso de prueba. Los resultados obtenidos muestran que, sin importar cuántos pasos de prueba se efectuaron, la disipación de energía baja al aumentar la relación yc/H .

En este estudio se midió al inicio la disipación de energía en un PKW. Luego, al montar escalones y deflectores en el vertedero, se determinó la disipación de energía respectiva en cada caso.

Materiales y métodos

Los experimentos se hicieron en un canal metálico (longitud = 7 m; ancho = 60 cm) con paredes de vidrio, en el Laboratorio de Organización de Agua y Electricidad de Khuzestan, Irán; se empleó un medidor de profundidad de punto (precisión de medición = 1

mm), para medir la altura del agua arriba y agua abajo del vertedero. La velocidad de flujo se midió a través de un manómetro y un vertedero triangular calibrado (Figura 2, a).

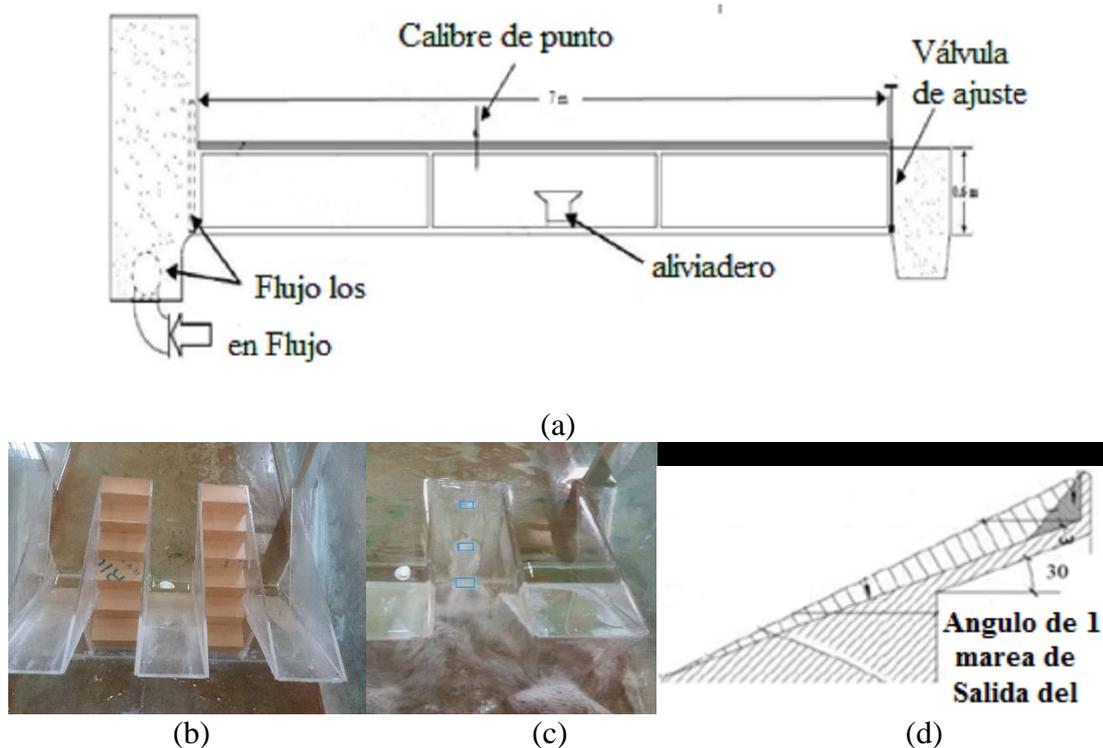


Figura 2. (a) Esquema del canal de laboratorio; (b) PKW escalonado; (c) PKW deflactado, y (d) esquema del ángulo del vertedero.

Se desarrollaron tres modelos de plexiglás, con ángulos de pendiente de 30, 35 y 40 para simular el PKW (Figura 2, b, c, d).

En este estudio, W_i es el ancho de la llave de entrada (= 10 cm); W_o , la llave de salida (= 10 cm); W_u , el ancho de un ciclo; W , el ancho del canal; B , la longitud del vertedero (de arriba hacia abajo) (= 40 cm); B_i , la longitud de la pendiente agua abajo; H_r , la profundidad del agua de la cola (aguas abajo) del vertedero; H_s , la

altura del agua sobre la cresta del vertedero; P , la altura del vertedero (= 20 cm); L , la longitud de la cresta del vertedero (= 40 cm), y L_0 es la longitud de la llave de salida.

Se han utilizado partes separadas para simular los escalones y deflectores (Hb representa la altura del escalón/deflector). Al instalar el vertedero y sellarlo con pegamento para acuarios, también se utilizó una válvula de mariposa, a fin de controlar la velocidad del flujo de agua hacia el canal. Las profundidades del agua en el vertedero agua arriba (en la región laminar a 40 cm del vertedero, para mayor precisión) y aguas abajo de la salida de la llave se midieron a través del medidor de profundidad. La Ecuación (2) y la Ecuación (3) se usaron para calcular la disipación de energía en el vertedero:

$$E_0 = y_0 + \frac{V_0^2}{2g} \quad (2)$$

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (3)$$

Al usar la profundidad del agua arriba (y_0), del agua abajo (y_1) y la velocidad del flujo (a partir de la Ecuación (4)), se calcula la energía en cada sección. La disipación de energía relativa para el flujo se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_1} \quad (4)$$

Análisis dimensional

Los parámetros que afectan la caída de energía se muestran en la Ecuación (5):

$$F = (W_i, W_o, W_u, W, B, B_i, H_r, H_s, y_c, g, \rho, \sigma, H, L_o, P, L, \mu, Q) \quad (5)$$

donde y_c representa la profundidad crítica ($y_c = (q^2/g)^{1/3}$); H es la altura del agua en el vertedero; σ , la tensión superficial (para agua a 20 ° C: 0.074); ρ , la masa de una unidad de volumen de agua (998.2 kg/m³); μ , la viscosidad dinámica; q , la descarga específica ($q = \frac{Q}{W}$), y g es la aceleración gravitacional (9.8 m/s²). Los siguientes parámetros se obtuvieron con análisis dimensionales, utilizando el teorema de Buckingham:

$$f = \left(\frac{H_d}{P}, \frac{H_s}{P}, \frac{H_s}{D}, \frac{Y_c}{H}, \frac{\Delta E}{H}, \frac{W_i}{H}, \frac{L}{H}, \frac{W}{H}, \frac{P}{H}, \frac{B_i}{H}, \frac{H_t}{P}, \frac{B_o}{H}, \frac{R}{H}, \frac{E_o}{H}, N, \frac{Q}{\sqrt{2g}LH^{1.5}}, \frac{\sigma}{\rho V^2 H}, \frac{\rho V H}{\mu}, \frac{V}{\sqrt{gH}} \right) = 0 \quad (6)$$

En la Ecuación (6), S es la relación de R/B ; y las relaciones de $\frac{Q}{\sqrt{2g}LH^{1.5}} \cdot \frac{\sigma}{\rho V^2 H} \cdot \frac{\rho V H}{\mu} \cdot \frac{V}{\sqrt{gH}}$ son números de Froude (Fr), número de Weber (We) y coeficiente de descarga (Cd), respectivamente. En la Ecuación (5) y Ecuación (6), W_i es el ancho de la entrada; W_o , el ancho de la salida; W_u , el ancho del ciclo; W , el ancho del canal; B , la longitud

del vertedero aguas arriba-aguas abajo; B_i , la longitud aguas abajo del saliente; H_r , la profundidad del agua en la base del vertedero; H_s , el nivel del agua en la parte superior del vertedero; Y_c , la profundidad crítica; H , el nivel del agua sobre el vertedero; σ , tensión superficial; ρ , densidad del agua; μ , viscosidad dinámica; L , la longitud de la cresta del vertedero; L_o , longitud de salida; g , aceleración gravitacional, y Q es el coeficiente de descarga.

Como el número de Reynolds más bajo en este documento es 3 500, se descuida su efecto. Además, dada la geometría fija del vertedero, la Ecuación (7) expresa la relación final para los parámetros adimensionales que afectan el coeficiente de descarga:

$$C_d = f\left(\frac{H_d}{p} \cdot \frac{Y_c}{H} \cdot W_e \cdot F_r\right) \quad (7)$$

Cabe señalar que el número de Froude en la parte superior del vertedero para todos los modelos es inferior a 1, cumpliendo las condiciones de flujo subcrítico en la parte superior.

Resultados y discusión

Para estudiar el efecto de los pasos y los deflectores en la disipación de energía en el vertedero se diseñaron diferentes experimentos en los modelos, con tres alturas de paso (1, 2 y 3 cm); tres deflectores cúbicos (con longitudes laterales de 1, 2 y 3 centímetros), y tres PKW

(con ángulos de inclinación de 30, 35 y 40 grados). En general, se llevaron a cabo 180 experimentos, con caudales que varían de 1 a 50 l/s. La disipación de energía relativa ($\frac{\Delta E}{E_0}$) se obtiene de la Ecuación (8):

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_1} \quad (8)$$

Los efectos respectivos de la relación adimensional yc/H (que expresa el efecto de la velocidad de flujo y la carga de agua del vertedero) y el número de Weber (que indica el efecto de la tensión superficial, debido al contacto directo entre el flujo y la estructura del vertedero) en la disipación de energía se examinó correctamente. La Tabla 2 muestra el resumen de los resultados.

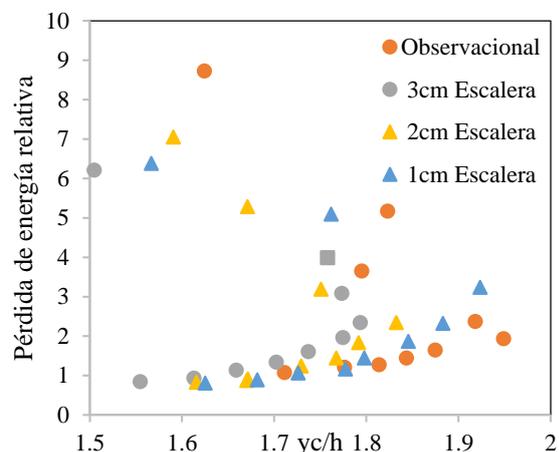
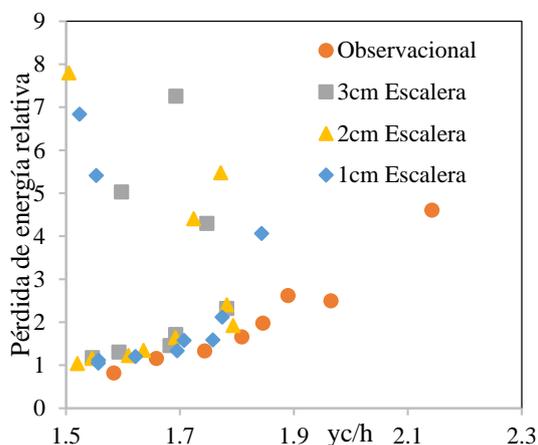
Tabla 2. El resumen de los resultados.

Modelo	El ángulo	Máximo de pérdida de energía relativa	yc/H	Modelo	El ángulo	Máximo de pérdida de energía relativa	yc/H
Observacional	30	8.2125	1.69	Observacional	30	8.2125	1.69
Bafel 3 cm	30	8.5565	1.93	Escalera 3 cm	30	7.2535	1.69
Bafel 2 cm	30	8.5565	1.93	Escalera 2 cm	30	7.7988	1.5
Bafel 1 cm	30	8.2125	1.69	Escalera 1 cm	30	6.8365	1.52
Observacional	35	8.6487	1.5	Observacional	35	8.6487	1.5

Bafel 3 cm	35	8.1682	1.93	Escalera 3 cm	35	6.2094	1.5
Bafel 2 cm	35	1.9412	1.13	Escalera 2 cm	35	7.0511	1.59
Bafel 1 cm	35	6.1749	1.69	Escalera 1 cm	35	6.3829	1.57
Observacional	40	2.9417	1.04	Observacional	40	2.9417	1.04
Bafel 3 cm	40	1.9551	1.04	Escalera 3 cm	40	3.5269	1.39
Bafel 2 cm	40	1.9551	1.04	Escalera 2 cm	40	3.407	4.71
Bafel 1 cm	40	1.6857	1.04	Escalera 1 cm	40	3.8271	1.34

Efecto de yc/H en la pérdida de energía relativa

El efecto de yc/H sobre la disipación de energía relativa se estudió en dos partes. En la primera (representada en la Figura 3), se observó el efecto de la altura del escalón/deflector en la pérdida de energía. En la segunda (mostrada en la Figura 4), se analizó el efecto del ángulo de la pendiente sobre la disipación de energía.



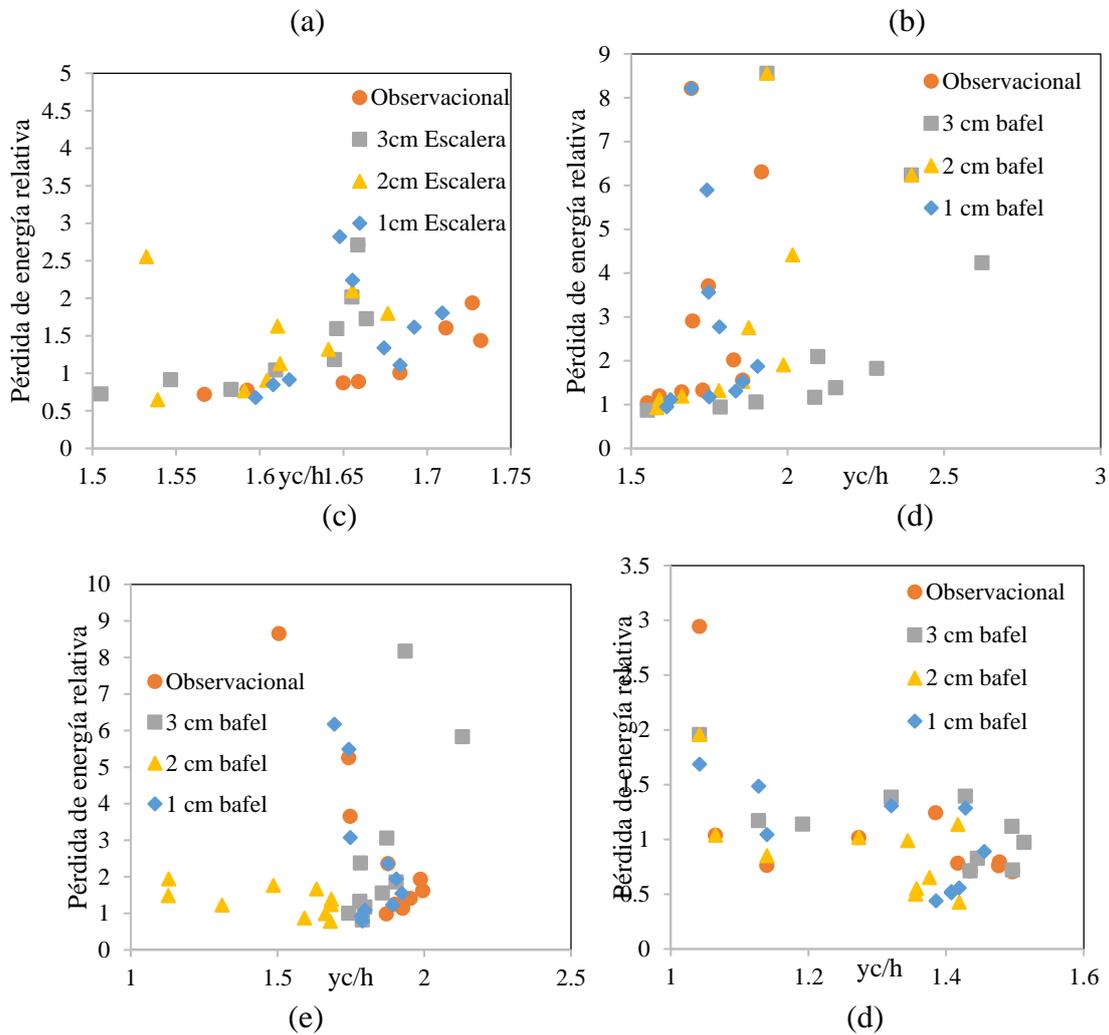
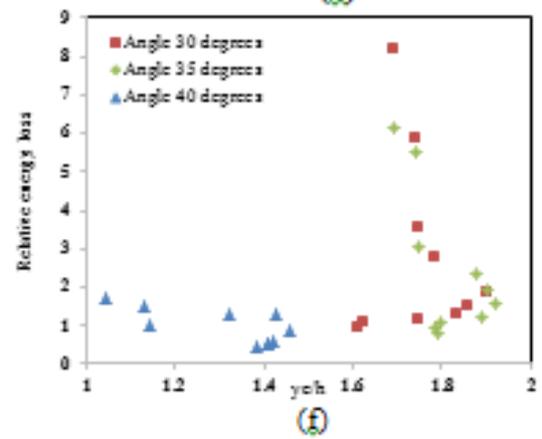
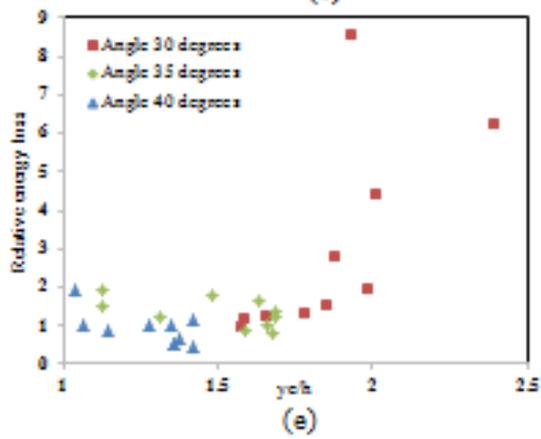
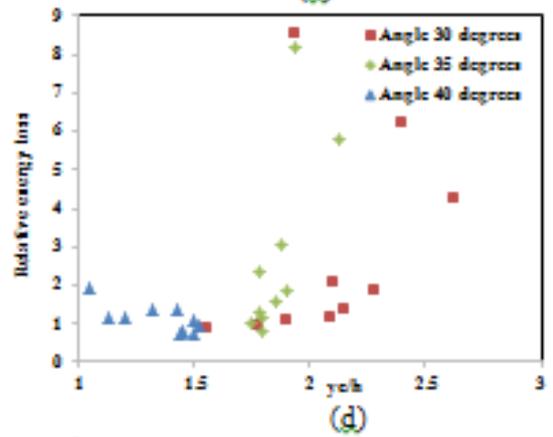
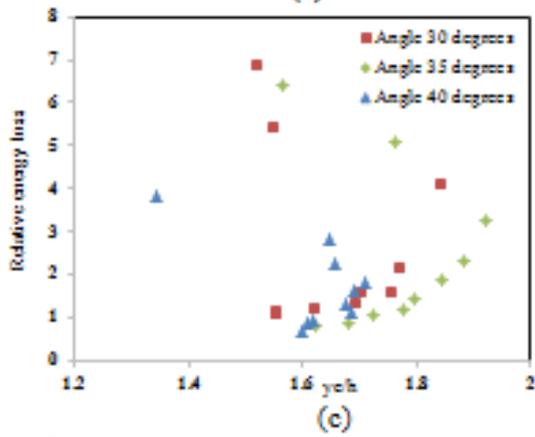
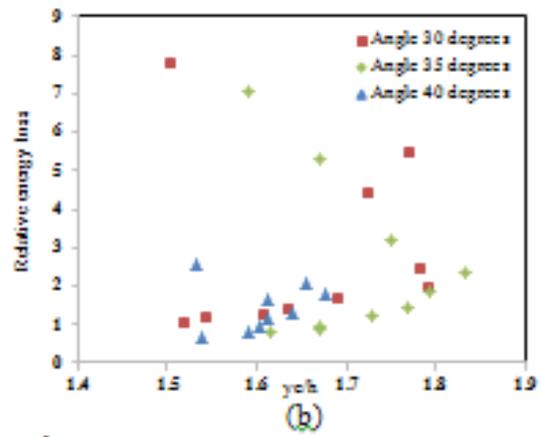
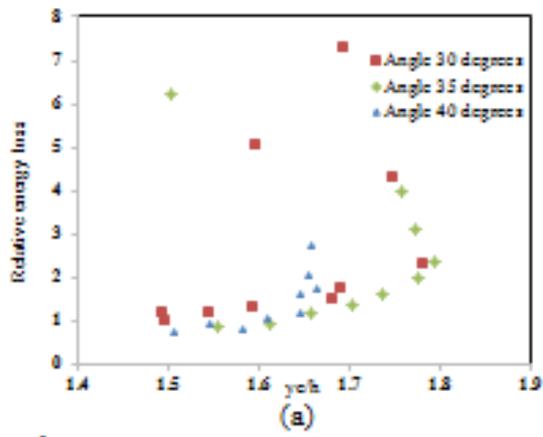


Figura 3. Vertedero escalonado con: (a) ángulo de pendiente de 30°; (b) ángulo de pendiente de 35°; (c) ángulo de pendiente de 40° y vertedero con deflector con, (d) ángulo de pendiente de 30°, (e) ángulo de pendiente de 35°, (f) ángulo de inclinación de 40°.



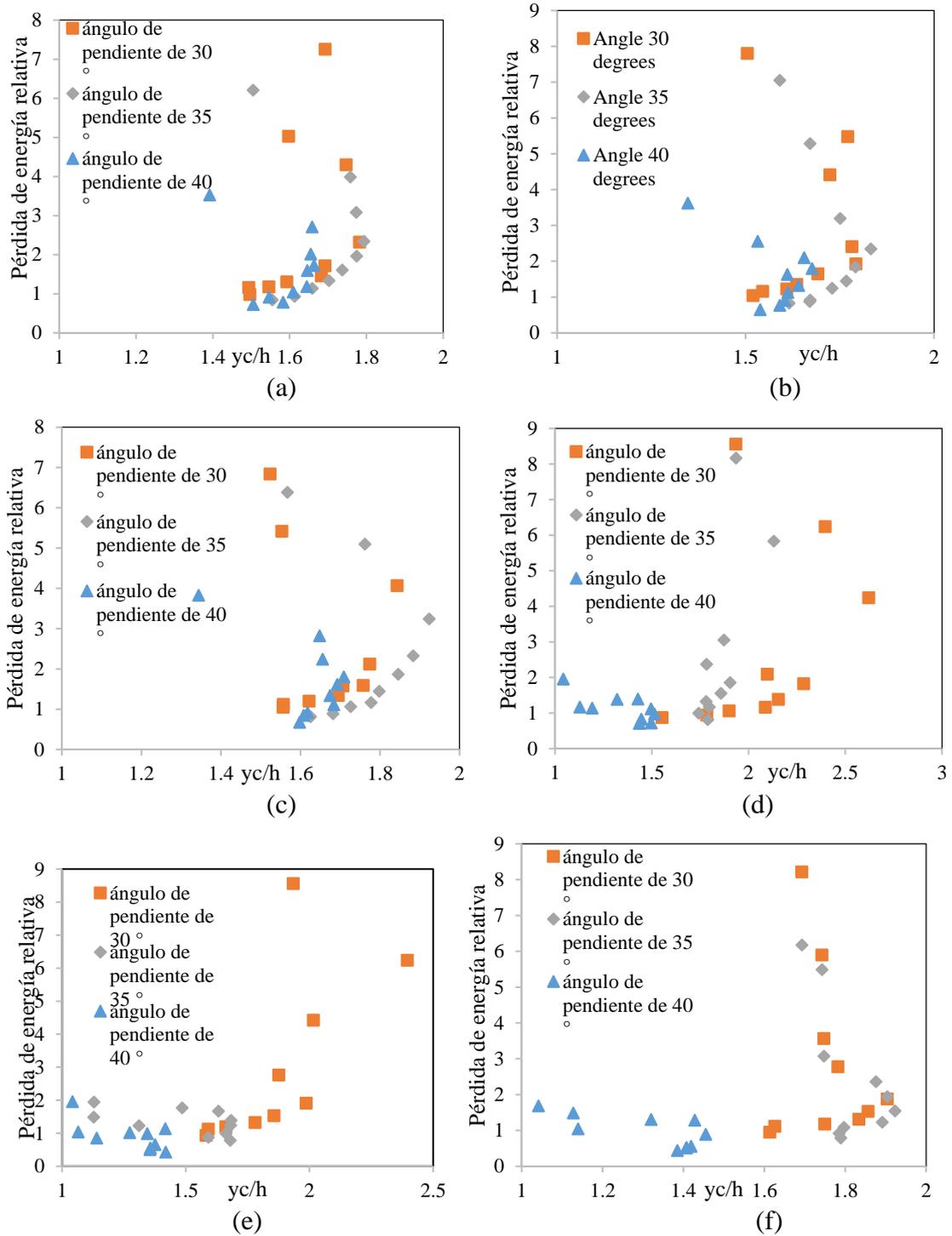


Figura 4. (a) Un paso grande (altura = 3 cm); (b) un paso medio (altura = 2 cm); (c) un paso pequeño (altura = 1 cm); (d) un

deflector grande (altura = 3 cm); (e) un deflector mediano (altura = 2 cm); (f) un deflector pequeño (altura = 1 cm).

Como se puede observar en la Figura 3 (a, b, c) (donde se calculan las pérdidas de energía correspondientes a tres ángulos de pendiente diferentes), aumentando el yc/H de 1.5 a 1.7, crece la pérdida de energía relativa. Sin embargo, esta tendencia se ha revertido a medida que yc/H se amplifica de 1.3 a 1.4, lo que conduce a una disminución correspondiente en la pérdida de energía. De acuerdo con estos diagramas, el aumento de la altura del escalón aumenta la pérdida de energía. Sin embargo, la mayor disipación de energía en el vertedero no atravesado ocurre a $yc/H > 1.3$. Como yc/H exhibe el efecto de la velocidad de flujo, y este crecimiento en la disipación de energía ocurre a valores de yc/H más pequeños, es posible concluir que a velocidades de flujo más bajas se forma un área de separación de flujo más pequeña en el vertedero no atravesado, lo que provoca mayor pérdida de energía.

La Figura 3 (d, e, f) muestra que el aumento de las dimensiones de los deflectores cúbicos redujo la disipación de energía en los tres ángulos de pendiente. Este resultado mejoró a medida que aumentó la velocidad de flujo, pues es más baja; la diferencia de disipación de energía entre los tres modelos ha sido muy pequeña. La mayor disipación de energía se logró para el vertedero con un ángulo de inclinación de 30° , equipado con un pequeño deflector. Tal resultado confirma el hecho de que reducir el espacio clave de salida incrementa el caudal y la energía en un PKW. Por lo tanto, se deben usar deflectores más pequeños para obtener mayor pérdida de energía.

La Figura 4 (a, b, c) muestra el efecto del ángulo de la pendiente sobre la disipación de energía en los vertederos escalonados probados. De estos diagramas se ha concluido que la mayor disipación de energía correspondiente al intervalo $1.6 < yc/H < 2.0$ se obtiene en presas con mayores alturas de paso. Sin embargo, la disipación máxima en los valores inferiores de yc/H se produce a una altura de escalón de 1 cm; indicando que, a velocidades más altas, la disipación de energía aumenta en vertederos con una altura de escalón de 3 cm, debido a la formación de una zona de separación más pequeña en dichos vertederos.

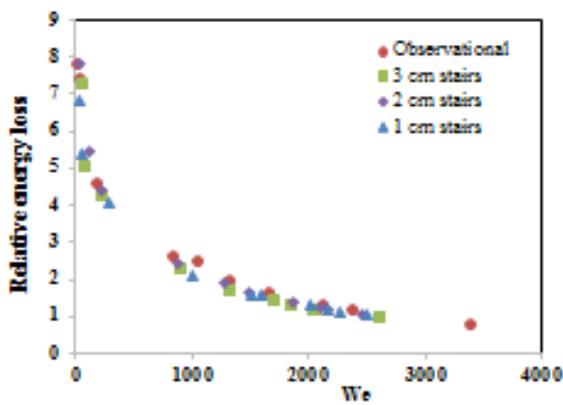
La Figura 4 (d, e, f) muestra el efecto del ángulo de inclinación del vertedero en la disipación de energía en vertederos con deflectores cúbicos. Como se puede observar, la disipación de energía está inversamente relacionada con el ángulo de la pendiente, por lo que aumentar la primera conduce a una disminución de la segunda. En consecuencia, el efecto de los deflectores en la reducción de la disipación de energía disminuye a medida que crece la altura del deflector.

Efecto del número de Weber en la disipación de energía relativa

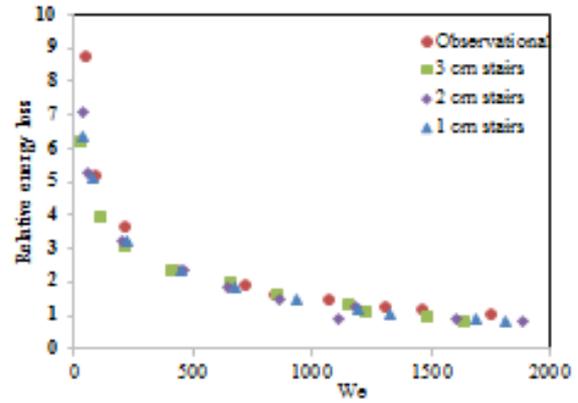
El número de Weber se ha calculado a partir de la Ecuación (9):

$$We = \frac{\rho V^2 H_s}{\sigma} \quad (9)$$

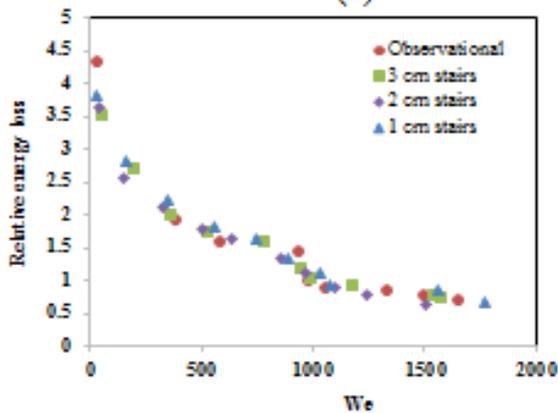
La Figura 5 y la Figura 6 muestran los resultados conseguidos en la sección. Como en la sección anterior, estos resultados implican dos partes.



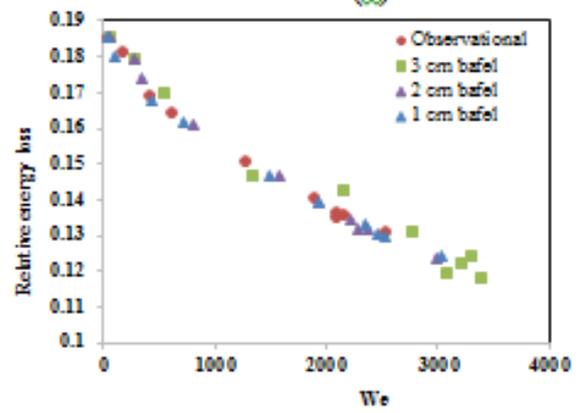
(a)



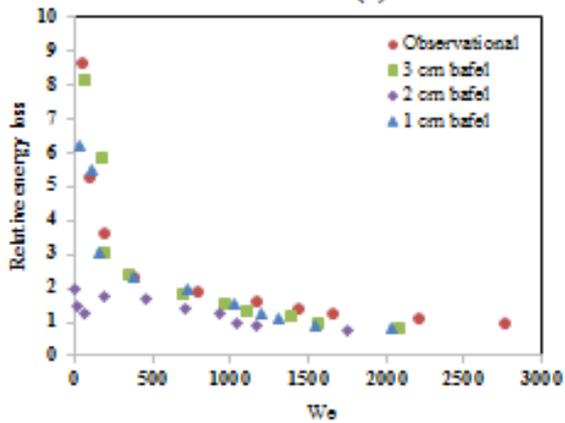
(b)



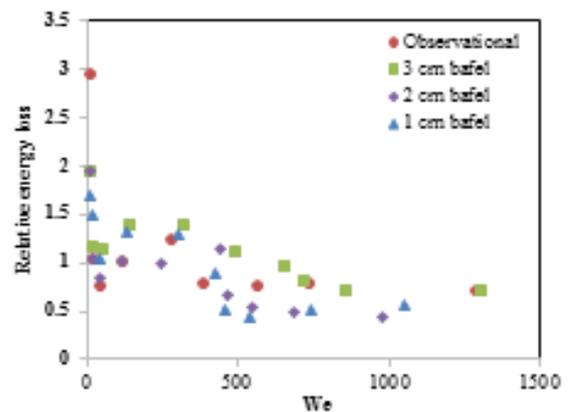
(c)



(d)



(e)



(f)

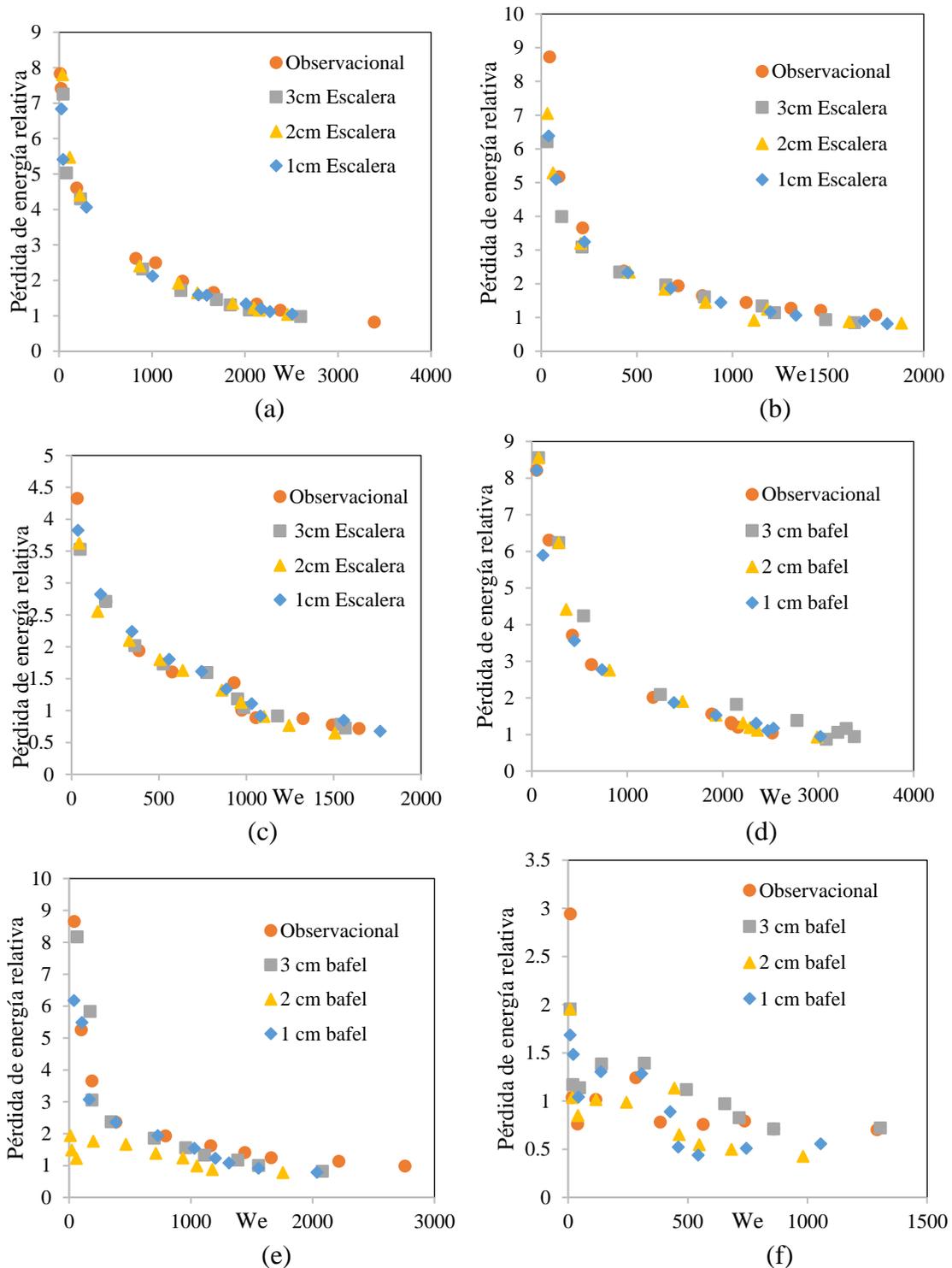


Figura 5. Vertedero escalonado con: (a) un ángulo de pendiente de 30°; (b) un ángulo de pendiente de 35°; (c) un ángulo de pendiente de 40° y (d) un deflector de 30°; (e) a 35° deflector; (f) un deflector de 40°.

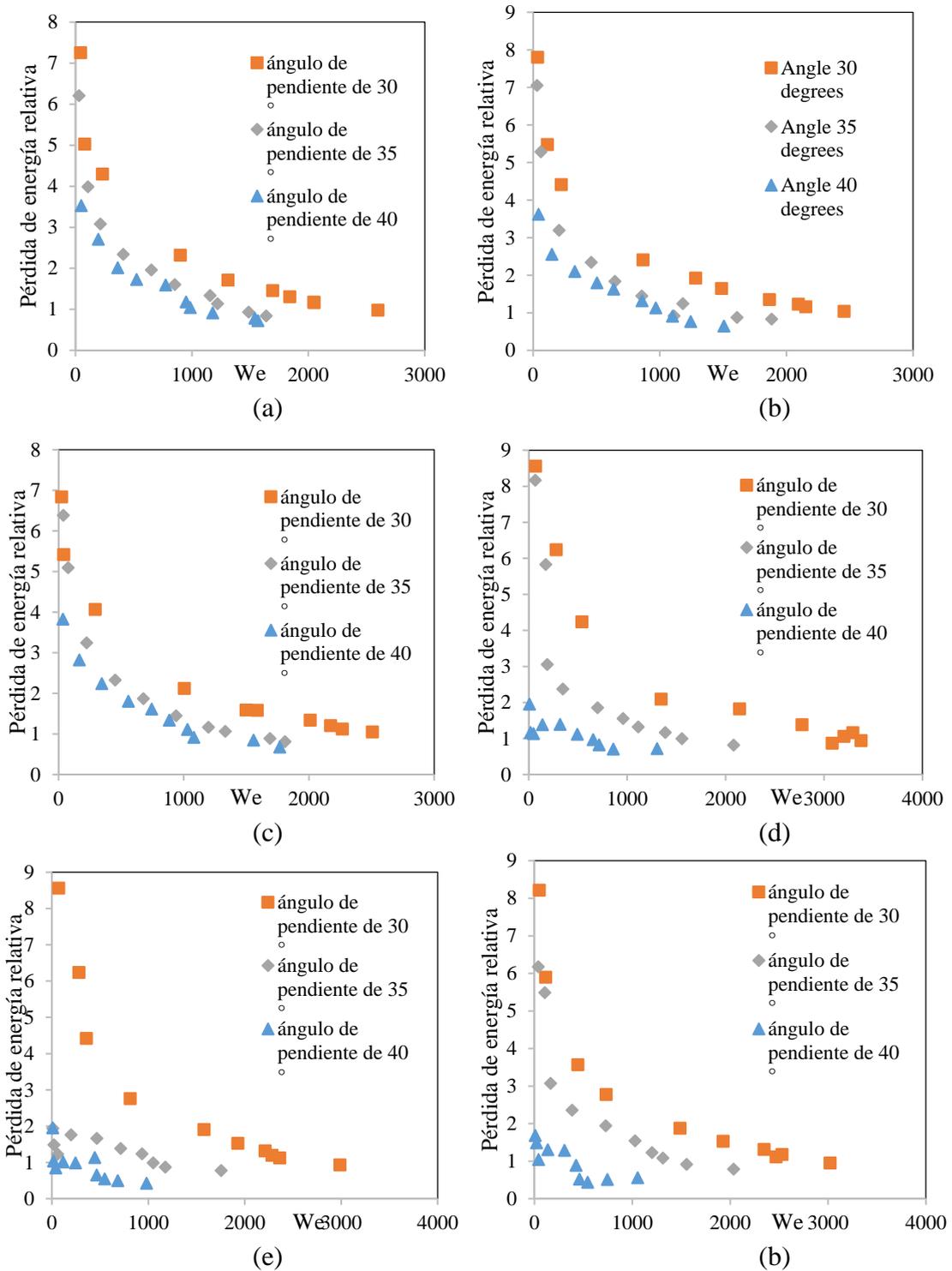


Figura 6. (a) Un escalón de gran tamaño (altura = 3 cm); (b) un escalón de tamaño mediano (altura = 2 cm); (c) un escalón de

tamaño pequeño (altura = 1 cm); (d) un gran escalón deflector de tamaño (altura = 3 cm); (e) un deflector de tamaño mediano (altura = 2 cm); (f) un deflector de tamaño pequeño (altura = 1 cm)

Como se puede observar en la Figura 5 (a, b, c), aumentar el número de Weber reduce la pérdida de energía. En el rango $1 < We < 500$, se obtuvo una disipación de energía de 45% para el vertedero no atravesado. Sin embargo, acrecentar el número de Weber cambió esa tendencia, lo que condujo a una mayor disipación de energía en los vertederos escalonados. Se consiguió una disipación de energía máxima de 5% a $We = 500$ en el vertedero con una altura de paso de 3 cm. En la Figura 5 (a, b, c) se observa que las mayores pérdidas de energía relativa ocurren en $We > 1\ 500$ para los siguientes vertederos: sin escalones, con escalones pequeños, con escalones medianos y con escalones de gran tamaño.

Por otro lado, en la Figura 5 (d, e, f), aumentar el número de Weber condujo a una disminución de la pérdida de energía. Por el contrario, las mayores pérdidas de energía se obtienen para los vertederos con deflectores grandes, medianos, pequeños y sin deflectores, respectivamente.

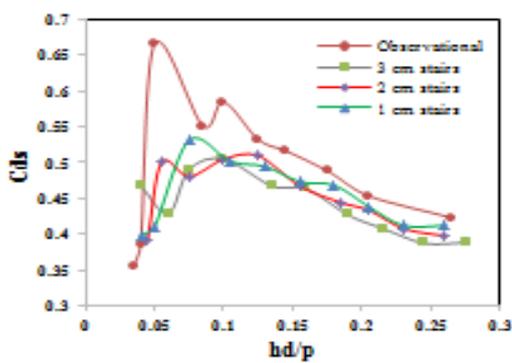
Como se puede observar en la Figura 6 (a, b, c), a medida que aumenta el número de Weber, se obtienen las mayores pérdidas de energía de alrededor de 69, 65 y 39% para los vertederos con escalones de 1, 2 y 3 cm, respectivamente.

En cuanto a la Figura 6 (d, e, f), de manera similar a los vertederos escalonados, la disipación de energía en los vertederos desconcertados, así como los efectos de los escalones y deflectores instalados, disminuyen con el ángulo de inclinación. Sin embargo, a

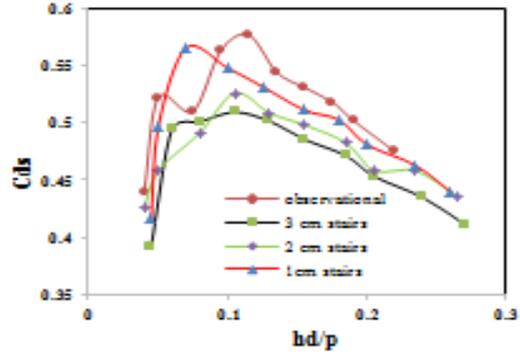
diferencia del caso de vertederos escalonados, donde el aumento de la altura del escalón reduce la disipación de energía relativa, el incremento de la altura de los deflectores cúbicos conduce a una reducción correspondiente en la disipación de energía.

Efecto del coeficiente de descarga específico

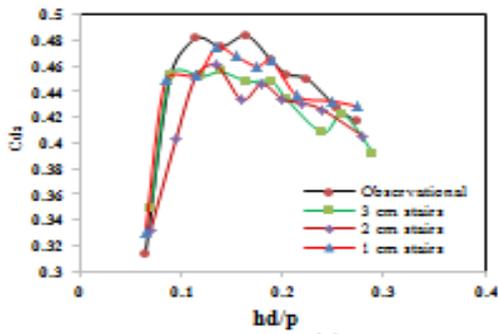
En esta sección se examina el efecto de la altura del escalón sobre el coeficiente de descarga específico (que es un índice de eficiencia del vertedero) (Figura 7).



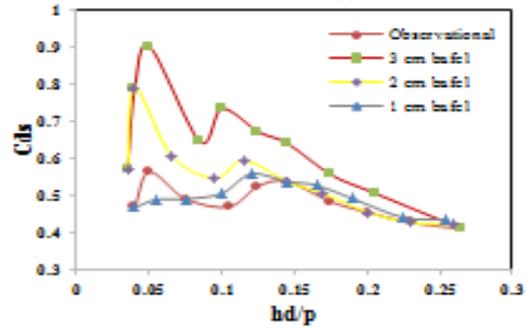
(a)



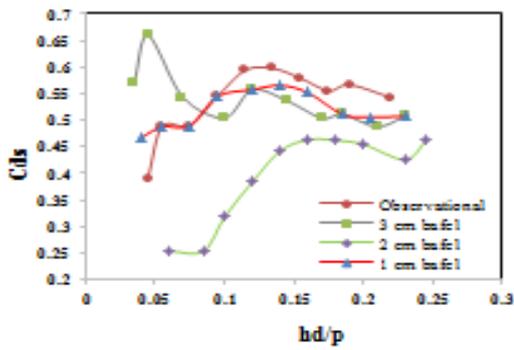
(b)



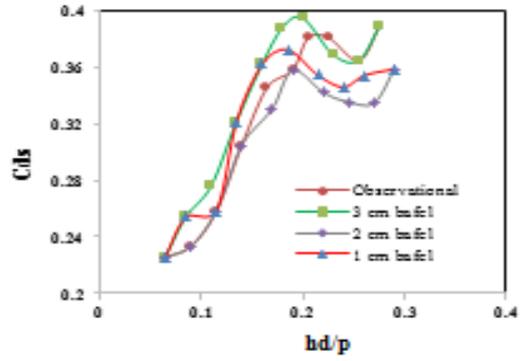
(c)



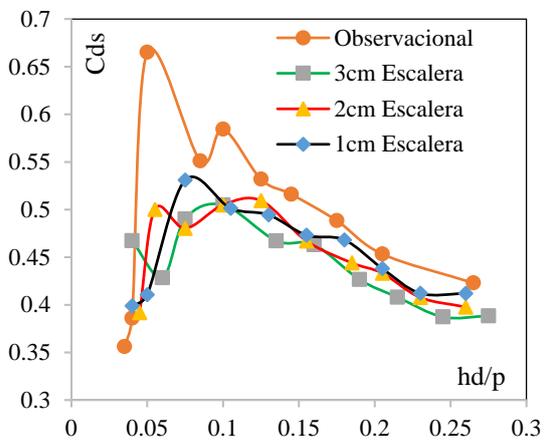
(d)



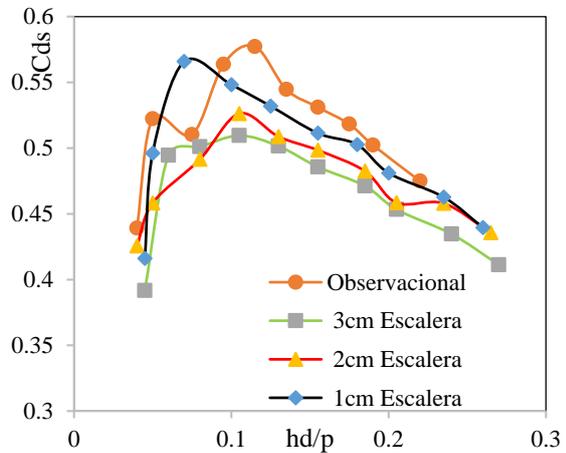
(e)



(f)



(a)



(b)

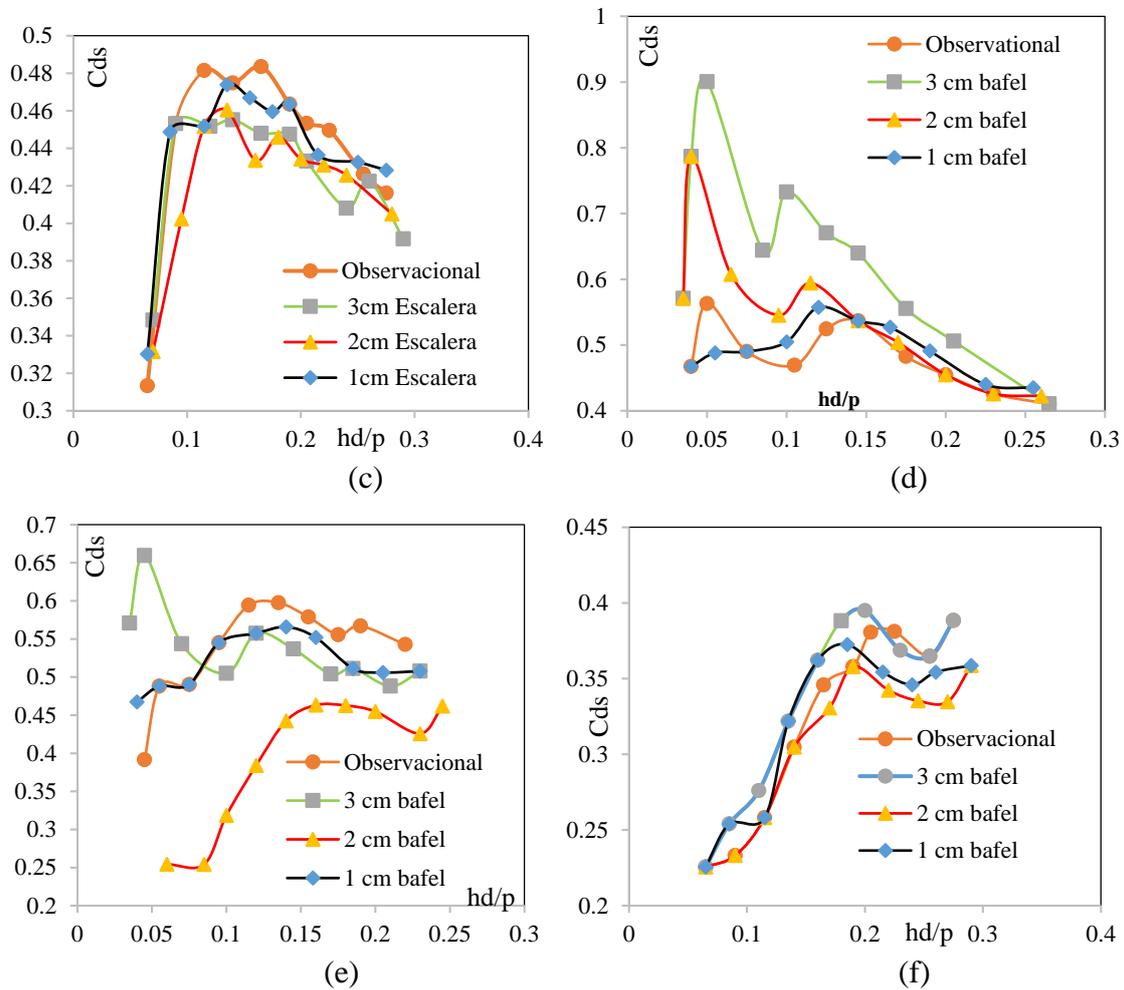
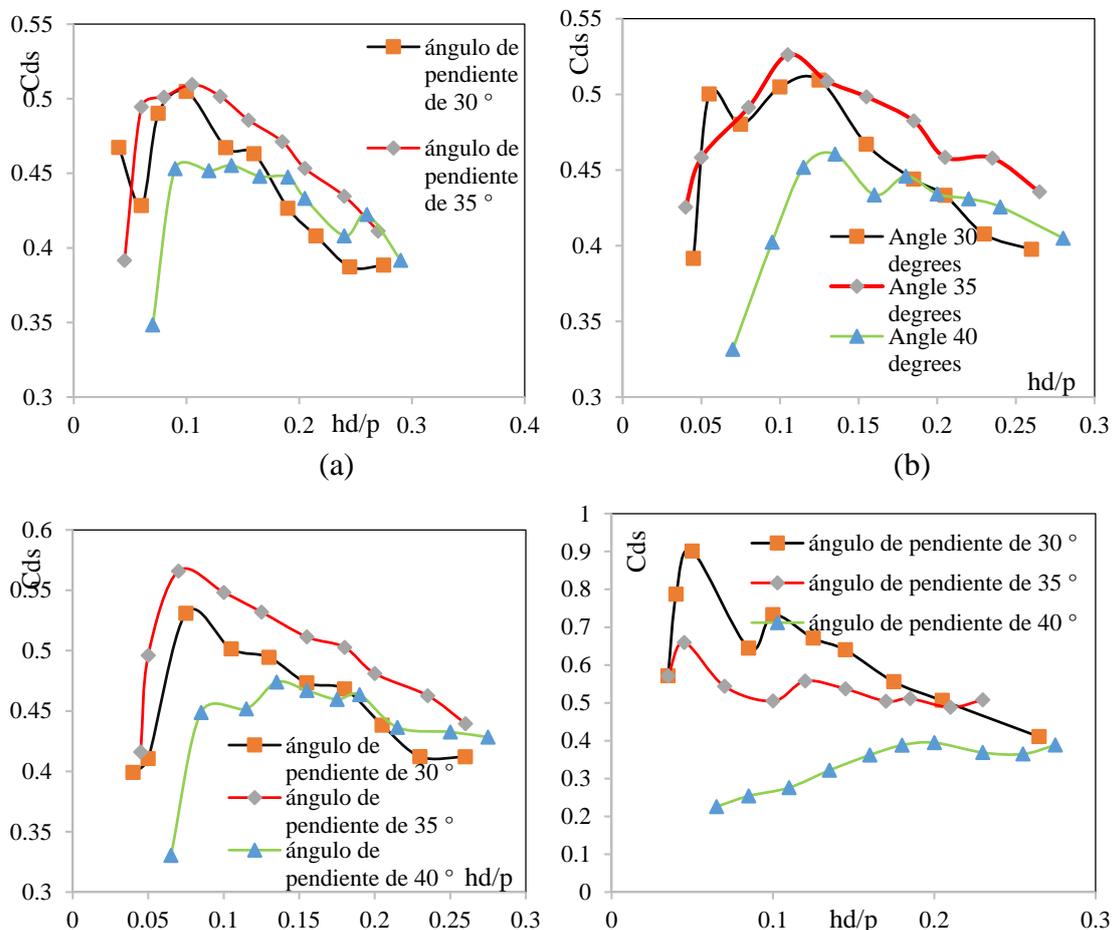


Figura 7. Variaciones de C_{ds} con hd/p en (a) ángulo de pendiente de 30° ; (b) ángulo de pendiente de 35° ; (c) ángulo de pendiente de 40° ; (d) ángulo de pendiente de 30° ; (e) ángulo de pendiente de 35° ; (f) ángulo de inclinación de 40° .

Como se puede observar en la Figura 7, el coeficiente de descarga máximo se obtiene para el vertedero sin detener que produce la mayor eficiencia; al aumentar la altura del escalón se reduce el coeficiente de descarga específico. Con base en la Figura 7, se puede concluir que un deflector más grande incrementa la eficiencia del vertedero más allá del valor observado. Esto muestra

que aunque un gran deflector exhibe un efecto negativo en términos de pérdida de energía, produce un efecto positivo en cuestión de eficiencia al aumentar la eficiencia del vertedero.

En la Figura 8 se tiene el coeficiente de descarga máximo (0.65) para el vertedero no atravesado, que también exhibe la mayor eficiencia. El aumento de la altura del escalón también conduce a una disminución correspondiente en el coeficiente de descarga específico. Se obtuvo un coeficiente de descarga máximo de 0.55 para el vertedero de 35°, con una altura de paso de 1 cm; mientras que se logró un coeficiente de descarga mínimo de 0.34 en los tres modelos de vertedero, para una altura de paso de 3 cm.



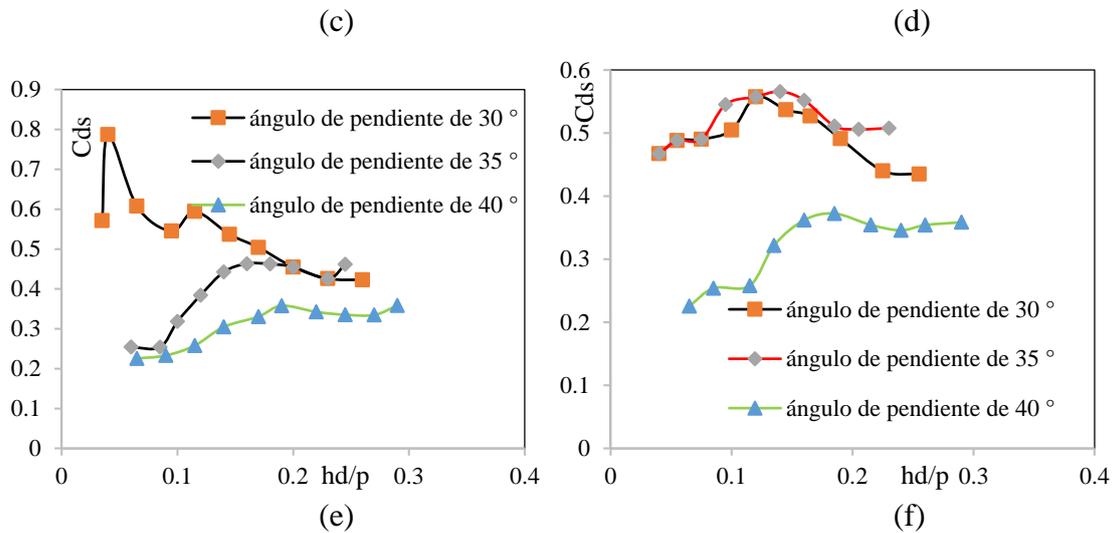


Figura 8. Variaciones de C_{ds} con hd/p en (a) altura de paso de 3 cm; (b) altura de paso de 2 cm; (c) altura de paso de 1 cm; (d) un deflector de 3 cm; (e) para un 2 cm deflector; (f) un deflector de 1 cm.

En conclusión, la Figura 7 y la Figura 8 se observa que aumentar el ángulo de la pendiente conduce a un incremento correspondiente en la eficiencia del vertedero. No obstante, el crecimiento de las dimensiones del deflector disminuye la eficiencia: para el deflector de 3 cm se obtiene una eficiencia máxima de 0.85 en un ángulo de 30°. Para el deflector de 2 cm (medio), se mide una disipación de energía máxima de 0.8 en un ángulo de 30°. Por último, se logra una eficiencia máxima de 0.55 para el deflector de 1 cm en el mismo ángulo de 30°.

Conclusiones

Los resultados adquiridos en el presente estudio mostraron que los vertederos desconcertados y escalonados producen pérdidas de energía de 85 y 80%, respectivamente. Por lo tanto, los deflectores tienen mayor efecto sobre la disipación de energía a través del vertedero. Además, se encontró que el ángulo de inclinación de las teclas de salida está inversamente relacionado con la pérdida de energía del vertedero. Sin embargo, el punto más significativo es que el efecto de los pasos del vertedero en la disipación de energía disminuye con el aumento del caudal.

Con números de Weber inferiores a 1 500 se consiguieron las mayores pérdidas de energía para el vertedero sin escalones, con escalones pequeños, con escalones medianos y con escalones grandes, respectivamente. En cuanto a los vertederos desconcertados, las mayores pérdidas se obtienen para el vertedero con deflectores grandes, medianos, pequeños y sin deflectores.

El crecimiento de la altura de los escalones ha conducido a un incremento en la disipación de energía en los vertederos escalonados. No obstante, en los vertederos desconcertados ocurre lo contrario, es decir, la disipación de energía aumenta al reducir la altura del deflector.

El mayor coeficiente de descarga (0.65) se obtuvo para el vertedero sin escalones, que exhibe la mayor eficiencia. El aumento de la altura del escalón reduce el coeficiente de descarga específico. Se logró una eficiencia mayor (que la eficiencia observada) instalando un deflector grande en el vertedero; pero la disminución de la dimensión del deflector conduce a una caída de energía, que resulta

en una reducción de la eficiencia por debajo de la eficiencia observada.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Organización de Agua y Electricidad, Khuzestan, Irán, por poner a su disposición el equipo de laboratorio requerido.

Referencias

- ASDSO, Association of State Dam Safety Officials. (2012). *Summary of Existing Guidelines for Hydrologic Safety of Dams* (pp. 1-22). Lexington, USA: Federal Emergency Management Agency.
- Beniston, M., Stephenson, D., Christensen, O., Ferro, C., Frei, C., Goyette, S., & Koffi, B. (2007). Future extreme events in European Climate: An exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81(1), 71-95. DOI: 10.1007/s10584-006-9226-z
- Chanson, H. (2001). *The hydraulics of stepped chutes and spillways*. Lisse, The Netherlands: Balkema.
- Dermawan, V., & Legono, D. (2011). Residual energy and relative energy dissipation on stepped spillway. *Journal of Applied Technology in Environmental Sanitation*, 1(4), 381-392.
- Kabiri-Samani, A., & Javaheri, A. (2012). Discharge coefficients for free and submerged flow over piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50(1), 114-120. DOI: 10.1080/00221686.2011.647888

- Lempérière, F. (2017). Dams and floods. *Engineering*, 3(1), 144-149.
- Lempérière, F., & Ouamane, A. (2003). The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways. *International Journal of Hydropower & Dams*, 5, 144-149.
- Ribeiro, M. L., Pfister, M., & Schleiss, A. J. (November, 2013). Overview of piano key weir prototypes and scientific model investigations. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs*, Paris, France.
- Suprpto, M. (2013). Increase spillway capacity using labyrinth weir. *Procedia Engineering*, 54, 440-446. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.03.039
- Tiwaria, H., & Sharma, N. (2015). Developments to improve hydraulic competence of spillways. *Aquatic Procedia*, 4, 841-846.
- Tullis, B. P., Young, J. C., & Chandler, M. A. (2007). Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(3), 248-254. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:3(248)