

Influencia de la geometría hidrodinámica en la disipación de energía de vertederos laberinto y vertedero rectangular con igual caudal de descarga

Influence of hydrodynamic geometry in the dissipation of energy from landfill labyrinth and rectangular weir with equal discharge flow and slope

Arturo Roldan Armando Reyes¹
Ricardo Narváez Aranda²
Fernando Rodríguez Avalos³

Recibido: 04 de mayo de 2019
Aceptado: 12 de mayo de 2019

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue determinar la influencia de la geometría hidrodinámica de cuatro vertederos laberinto y un vertedero rectangular, con igual caudal de descarga y pendiente, en la disipación de energía. El estudio fue experimental con modelos a escala; los ensayos se realizaron en el Canal de Pendiente Variable de la Universidad Privada Antenor Orrego, distrito de Trujillo, provincia of Trujillo, región La Libertad. El aforamiento del canal se calibró mediante mediciones volumétricas de los caudales y el análisis del comportamiento del flujo, a través de los ensayos con prototipos fabricados de acero de 5 mm de espesor; los vertederos laberinto triangular y trapezoidal se ensayaron con caudales de 9.104, 13.201 y 19.141 L/s, con pendientes de 0 y 1%. Los vertederos rectangulares y circulares se ensayaron con caudales de 9.104 y 13.201 L/s, con pendiente de 0%. El porcentaje de disipación de energía para el vertedero laberinto tipo triangular fue 11.33 y 13.67%; para el laberinto trapezoidal, 11.00 y 12.33%; para el tipo rectangular y circular, 8 y 7%, respectivamente, con pendiente de 0%; el vertedero rectangular convencional sin contracciones laterales no disipó energía. La geometría hidrodinámica de los vertederos tipo laberinto influye en la disipación de energía.

Palabras claves: Geometría hidrodinámica, vertedero laberinto, disipación de energía.

1 Ingeniero Civil - Universidad Privada Antenor Orrego

2 Maestro en Ingeniería de Recursos Hídricos - Universidad Privada Antenor Orrego

3 Ingeniero Químico. Master of Science. Doctor en Educación. Profesor Principal de la Universidad Privada Antenor Orrego

ABSTRACT

The aim of this research was to determine the influence of hydrodynamic geometry of four labyrinth landfills and a rectangular weir, with equal discharge and slope, on energy dissipation. The study was experimental with scale models; the tests were carried out in the Variable Slope Channel of the Antenor Orrego Private University, district of Trujillo, province of Trujillo, region La Libertad (Peru). The channeling was calibrated by means of flow volumetric measurements and flow behavior analysis, through tests with prototypes made of 5 mm thick steel; the triangular and trapezoidal labyrinth landfills were tested with flow rate of 9,014, 13,201 and 19,141 L /s, with slopes of 0 and 1%. Rectangular and circular landfills were tested with flow rates of 9,104 and 13,201 L/s, with 0% slope. The energy dissipation percentage for the triangular type labyrinth landfills was 11.33 and 13.67%; for the trapezoidal labyrinth, 11.00 and 12.33%; for the rectangular and circular type, 8 and 7%, respectively, with 0% slope; the conventional rectangular landfills without lateral contractions did not dissipate energy. The hydrodynamic geometry of labyrinth type landfills influences the dissipation of energy.

Key words: Hydrodynamic geometry, labyrinth landfill, energy dissipation

INTRODUCCIÓN

Los vertederos permiten la descarga del caudal cuando la presa está a su nivel máximo normal, a este fenómeno se le conoce como tránsito de ondas de avenida de presas. Actualmente, debido a los cambios climáticos, muchas presas en funcionamiento están sujetas a una constante modificación en la mecánica del flujo inicial, como el aumento del volumen de descarga y almacenamiento, en donde se destaca que uno de los problemas más notables es la sedimentación, por lo que es necesario modificar los mecanismos de control de la presa para mantener el volumen de almacenamiento, sin modificar otros elementos de gran escala; por lo cual, se genera la necesidad de aumentar la longitud efectiva de descarga en los vertederos de los embalses (Alegret y Pardo, 2005).

La disipación de energía es importante, porque permite que la entrega del flujo al cauce sea en condiciones normales y tranquilas, lo cual se logra con la disminución de velocidad y evitar la socavación de estructuras hidráulicas y las erosiones aguas abajo del cauce. La disipación de la energía cinética puede lograrse mediante el incremento de la rugosidad del impacto y por generación de resalto hidráulico (Martínez, 2011).

Rodríguez (2015) presentó una metodología para el diseño hidráulico de vertederos de laberinto, considerando que la evaluación del estado físico de

las presas es una tarea permanente, reportándose de manera recurrente el funcionamiento de los vertedores, disminuidos en su capacidad de desfogue. El autor considera que la particularidad de este tipo de estructuras hidráulicas reside en la forma del vertedor, que vista en planta se asemeja a un "zig-zag", en su geometría espacial que incrementa la longitud del vertedor y aumenta la capacidad de descarga, lo que le permite adaptarse a un espacio disponible determinado; concluyen en que los vertedores laberinto son estructuras hidráulicas de alta capacidad de descarga, con la ventaja adicional que para su implementación requiere de menor espacio para el diseño de las obras de excedencias; además, considera que las actividades de diseño requieren prototipos para el estudio en detalle del comportamiento hidráulico de las descargas.

Érises (2013) investigó sobre la influencia de aproximaciones hidrodinámicas en los ápices de vertederos en laberinto y coeficientes de descarga, mediante un modelo experimental a escala; verificó el funcionamiento de estos vertederos de acuerdo con distintas configuraciones de aproximaciones hidrodinámicas en los ápices, para lo cual, se desarrolló un modelo hidráulico para el cálculo empírico de los coeficientes de descarga según la ecuación de Tullis. El estudio hidráulico evidenció la conveniencia de tener una aproximación inclinada

hacia la cara frontal del ápice del vertedero, con una pendiente suave de entrada. La implementación de las aproximaciones hidrodinámicas a los vertederos laberinto aumentaron su coeficiente de descarga y, de esta forma, se mejoró significativamente los volúmenes de descarga.

Medina y Sifontes (1992) investigaron el comportamiento hidráulico del aliviadero del proyecto Yacambu, mediante ensayos experimentales en un modelo a escala 1:45, construido en el laboratorio del Departamento de Hidráulica de Edelca en Macagua, con la finalidad de verificar el comportamiento hidráulico de esta estructura, tomando en cuenta que parte de las estructuras de concreto del aliviadero ya habían sido construidas. Los efectos del comportamiento del flujo en una transición convergente, y la determinación de la sección de control son característicos de cada proyecto y complejos de estudiar satisfactoriamente basados exclusivamente en la utilización de expresiones teóricas; por lo tanto, se estima esencial la experimentación sobre un modelo físico para verificar el diseño de un aliviadero tipo abanico.

El objetivo de la presente investigación fue determinar la influencia de la geometría hidrodinámica en la disipación de energía de cuatro vertederos tipo laberinto y un vertedero tipo rectangular con igual caudal de descarga y pendiente.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La investigación se desarrolló considerando los parámetros experimentales en la elaboración de ensayos y la manipulación de los prototipos, con el fin lograr el objetivo propuesto. Para establecer la disipación de energía en el flujo, se aplicó la metodología de tipo de Resalto Hidráulico, generado por cada uno de los prototipos, con variación en el caudal y la pendiente longitudinal dentro del canal de pendiente variable, del Laboratorio de Hidráulica y Mecánica de Fluidos de la Universidad Privada Antenor Orrego (UPAO).

EQUIPAMIENTO

Los ensayos se realizaron en un canal de pendiente variable modelo H91.8D (Figura 1), de 0.30 m de ancho; 0.50 m de altura, 15 m de longitud. Las pendientes se ajustaron hasta +3.0 y -0.5 grados, con un mecanismo de manivelas accionado

por un motor que permitía variar en continuo dicha inclinación. El impulso del caudal se realizó con una electrobomba centrífuga de 4 HP, con válvula mariposa para el control del flujo ($Q_{max/min} = 150/48 \text{ m}^3/\text{h}$); también se usó un manómetro para medir presiones negativas que puedan producir cavitaciones en la bomba.



Figura 1: Canal de pendiente variable
Fuente: Laboratorio de Hidráulica y Mecánica de Fluidos de UPAO (2017)

Criterios para el diseño y fabricación de los prototipos experimentales:

Érises (2013) en su investigación presenta una selección de ecuaciones de diseño desarrolladas por otros autores, a través de las observaciones realizadas a sus respectivos trabajos de investigación. Estas ecuaciones determinan el número y ancho de ciclos, longitud de cresta del vertedero, ángulo de apertura entre las paredes del ciclo, longitud de la pared larga del vertedero y altura de la pared del vertedero tipo laberinto:

- Número de ciclos (n) a utilizar en el vertedero en base al caudal a descargar: $Q/Q_c = n$, Donde Q es el caudal descargado por el vertedero tipo laberinto y Q_c es el caudal descargado por un vertedero de cresta recta.
- El ancho de cada ciclo (W) se obtiene de la división entre el ancho del canal de vertedero (W_c) y el número de ciclos (n): $W = W_c/n$
- La longitud de la cresta (L) está dada por la siguiente ecuación: $L = 2b + 4^a$, donde (b) es la longitud de la pared del vertedero y (a) es el valor que corresponde a la mitad del ápice.
- El ángulo (α) que se produce entre las paredes del vertedero tipo laberinto, presento una gráfica para diferentes valores sometidos a experimentación para ángulos entre 6 y 90°.
- Se define por ápice al extremo superior o punta de algo. En el caso particular del modelo a

ensayar los ápices corresponden a sus caras frontales perpendiculares al flujo. El cálculo de la longitud del ápice viene dado por un coeficiente expresado entre la longitud de su ciclo (Le) y su propia longitud (a): $a/Le > 0.08$.

- La longitud de la pared de vertedero (B) resulta de la ecuación $B = (L-2(2a))/2$, Donde (a) corresponde al valor de la mitad del ápice y (L) es la longitud de la cresta.
- La altura de la pared de vertedero como criterio constructivo es de 8 a 10 cm.
- Se considera una posición normal del vertedero hacia la pared del canal de alivio, al descargar 9% mayor que la observada en una posición invertida.

Con los criterios indicados se fabricó los vertederos con material de acero, formados por una base de 5 mm de espesor y un cuerpo de vertedero, en los que se toma en cuenta la geometría hidrodinámica acondicionadas a medida, para el canal de pendiente variable.

Procedimiento de los ensayos

Cada uno de los vertederos se ubicaron a 5 m del tanque de distribución, para observar el comportamiento del fluido aguas arriba, sobre la cresta del vertedero y aguas abajo. Antes de iniciar los ensayos con los vertederos tipo laberinto, se usó el vertedero tipo rectangular sin contracciones laterales para calibrar los caudales mediante ensayos de aforo volumétricos, con caudales de: 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 m³/h, indicados por el rotámetro. Cada uno de los vertederos tipo laberinto fueron ensayados a pendientes de 0, 1 y 2% con cuatro caudales seleccionados en cada ensayo. Se observó tirantes y velocidades del fluido en 10 puntos cada 10.00 cm del vertedero aguas arriba y aguas abajo; y las velocidades y cargas hidráulicas sobre el vertedero. Para las velocidades se usó un equipo digital adjunto al canal de pendiente variable.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS PROTOTIPOS

Las características geométricas de los vertederos laberinto consideradas en el ítem 2.1 se presentan en la Tabla 1 y en la Figura 2 se muestra los vertederos construidos.

Tabla 1. Elementos geométricos de los vertederos

Vertedero laberinto	n	P (m)	α (°)	a (m)	Wc (m)	W (m)	L (m)	B (m)
Triangular	2	0.20	22	-	0.30	0.15	0.38	0.19
Trapezoidal	2	0.20	12	0.04	0.30	0.15	0.48	0.16
Rectangular	2	0.20	-	0.08	0.30	0.15	0.62	0.15
Circular	2	0.20	-	0.12	0.30	0.15	0.70	0.11
Vertedero rectangular	-	0.20	-	-	0.30	-	-	-

(-): sin resultados numéricos



Figura 2. Vertedero laberinto circular, triangular, rectangular y trapezoidal



CALIBRACIÓN DE ROTÁMETRO

En la Tabla 2, se muestra los resultados de la calibración del rotámetro para diferentes caudales mediante ensayos volumétricos usando el vertedero tipo rectangular.

Tabla 2. Resultados de la calibración de rotámetro para diferentes caudales reales (Qr)

Q(m ³ /h)	Q(L/s)	Qr(L/s)
20	5.556	9.104
25	6.944	10.848
30	8.333	13.201
35	9.722	15.801
40	11.111	19.141
45	12.500	21.963
50	13.889	28.581

MEDICIONES PARA DETERMINAR COEFICIENTES DE DESCARGA (CD)

En la Tabla 3, se presenta la carga hidráulica obtenida de los ensayos considerando cuatro caudales: 9.104, 13.201 y 19.141 L/s para tres pendientes: 0, 1 y 2%, y en la Tabla 4, se presenta los tirantes y velocidades del vertedero laberinto triangular para un caudal de 9.104 L/s con pendiente de 1%; de igual manera se realizó para los demás vertederos con diferentes caudales y pendientes.

Tabla 3. Carga hidráulica (H) de vertedero laberinto

Vertedero laberinto	Caudal Qr (L/s)	Pendiente		
		0%	1%	2%
triangular	9.104	0.0440	0.0440	0.0440
	13.201	0.0590	0.0590	0.0590
	19.141	0.0730	0.0730	0.0730
	28.581	0.0860	0.0860	0.0860
trapezoidal	9.104	0.0375	0.0375	0.0375
	13.201	0.0510	0.0510	0.0510
	19.141	0.0650	0.0650	0.0650
	28.581	0.0770	0.0770	0.0770
rectangular	9.104	0.0370	0.0370	0.0370
	13.201	0.0515	0.0515	0.0515
	19.141	0.0645	0.0645	0.0645
	28.581	0.0745	0.0745	0.0745
circular	9.104	0.0350	0.0350	0.0350
	13.201	0.0490	0.0490	0.0490
	19.141	0.0620	0.0620	0.0620
	28.581	0.0700	0.0700	0.0700

Tabla 4. Tirantes y velocidades del vertedero laberinto triangular para caudal Q = 9.104 L/s y pendiente s = 1%

Mediciones	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
aguas Y (cm)	23.20	23.30	23.40	23.60	23.70	23.80	24.00	24.20	24.30	24.40
arriba V (Hz)	3.26	3.24	3.20	3.20	3.10	3.08	3.07	3.07	3.06	2.77
aguas Y (cm)	4.80	4.80	4.70	4.80	4.90	4.90	4.80	4.90	4.80	4.80
abajo V (Hz)	17.20	17.10	17.20	17.30	17.20	17.20	17.20	17.10	17.10	17.20

ANÁLISIS DE LAS ECUACIONES DE LOS VERTEDEROS, COEFICIENTES DE DESCARGA Y CAUDALES

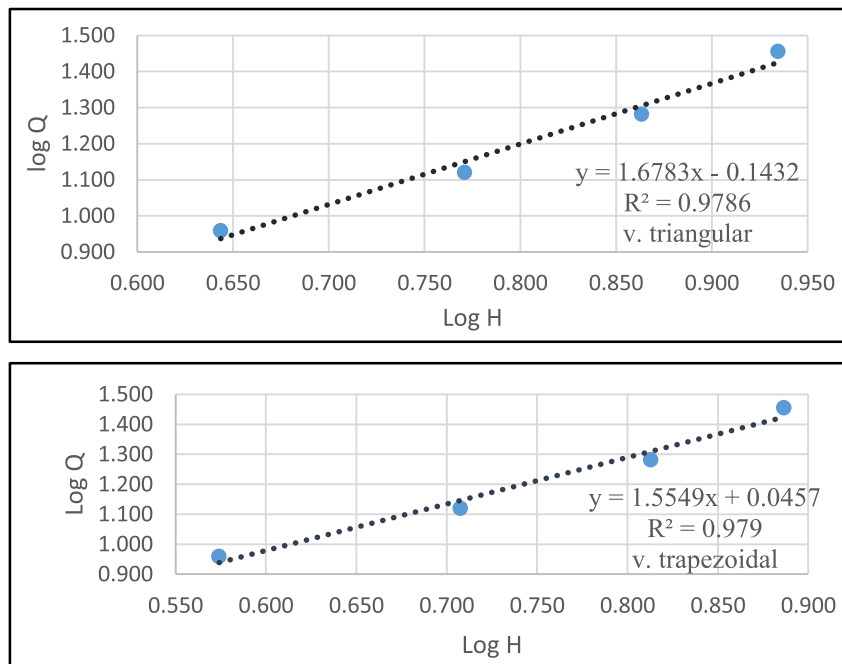
De acuerdo con las fórmulas para vertederos, su ecuación básica experimental es de tipo exponencial, representada por la ecuación (1), en la cual se conoce los valores de la carga hidráulica (H) y es necesario calcular los coeficientes k y n:

$$Q = kH^n \quad (1)$$

Con la aplicación de logaritmos a la ecuación (1), se obtienen la ecuación (2), que tiene forma de una ecuación de una recta $Y = mX + b$. En la Figuras 3, se muestran la gráfica de $\log Q$ en función de $\log H$ de los vertederos:

$$\log Q = \log k + n \log H \quad (2)$$

Figura 3. Línea de tendencia del $\log Q$ con $\log H$ de los vertederos triangular y trapezoidal



De las gráficas se obtienen las ecuaciones, según el tipo de vertedero laberinto ensayado:

Triangular : $y = 1.6783x - 0.1432$, de donde $n = 1.678$ y $k = 0.719$ (3)

Trapezoidal : $y = 1.5549x + 0.0457$, de donde $n = 1.554$ y $k = 1.111$ (4)

Rectangular : $y = 1.5802x + 0.0344$, de donde $n = 1.5802$ y $k = 1.0824$ (5)

Circular : $y = 1.5694x + 0.0777$, de donde $n = 1.5694$ y $k = 1.1959$ (6)

Con los valores de n y k se obtienen las ecuaciones generadas específicas para cada vertedero tipo laberinto:

Triangular : $Q = 0.7191H^{1.6783}$ (7)

Trapezoidal : $Q = 1.1110H^{1.5549}$ (8)

Rectangular : $Q = 1.0824H^{1.5802}$ (9)

Circular : $Q = 1.1959H^{1.5694}$ (10)

Con las ecuaciones de calibración, se calcula el caudal generado, y se compara con el caudal real, a la vez se calcula el porcentaje de error entre ambos y se grafica la curva de calibración de los vertederos (Figura 4):

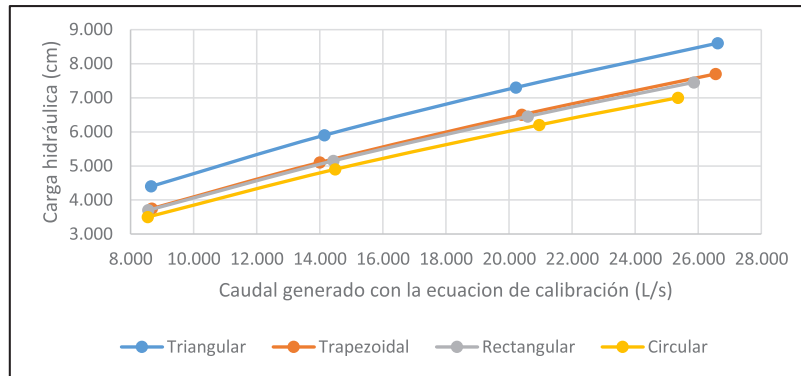


Figura 4. Curvas de calibración para vertederos tipo laberinto

De acuerdo con la fórmula general caudal-teórico, en el análisis se utilizó la ecuación (11) basada en elementos del vertedero, flujo descargado y la carga hidráulica:

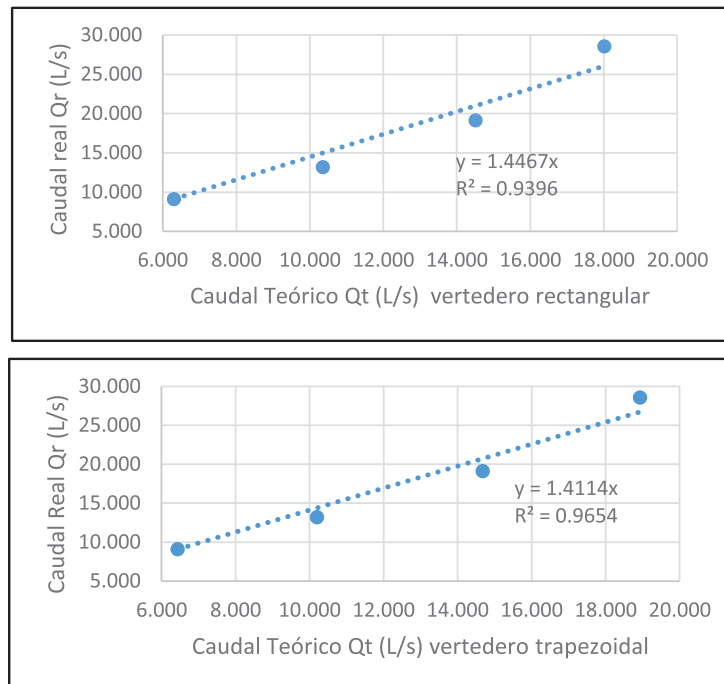
$$Qt = \frac{2}{3} Cd L \sqrt{2g} H^{1.5} \quad (11)$$

Donde:

- Q = caudal de descarga del vertedero en laberinto
- Cd = coeficiente de descarga
- L = longitud efectiva
- g = aceleración de gravedad
- H = carga hidráulica.

De esta manera se definió el coeficiente de descarga (Cd) como una constante o valor de corrección calculado en la comparación lineal entre los caudales teóricos Qt (L/s) y los caudales reales Qr(L/s) calibrados (Tabla 5). En la Figura 5, se muestra los gráficos del caudal teórico y caudal real para vertedero laberinto rectangular y trapezoidal:

Figura 5. Caudal teórico y caudal de vertedero laberinto rectangular y trapezoidal



Las gráficas responden a una ecuación lineal de la recta: $y=kx$, donde: y = caudal real (L/s), k = coeficiente de descarga (valor de corrección), x = caudal teórico (L/s). Con las ecuaciones de calibración generadas, se calcula el caudal teórico rectificado y, se compara resultados, a la vez, se calcula el porcentaje de error entre ambos (Tabla 5):

Triangular : $Q = 0.7845 * L * \sqrt{2g} * H^{1.5}$ (12)

Trapezoidal : $Q = 0.9409 * L * \sqrt{2g} * H^{1.5}$ (13)

Rectangular : $Q = 0.9645 * L * \sqrt{2g} * H^{1.5}$ (14)

Circular : $Q = 1.0424 * L * \sqrt{2g} * H^{1.5}$ (15)

Tabla 5: Caudales teóricos rectificados, caudales reales y porcentajes de error

Vertedero laberinto	Ot (L/s)	Qt (L/s)	Error (%)	Qt recificado (L/s)	Qr (L/s)	Error (%)
triangular	8.176	9.104	10.19	9.622	9.104	5.69
	12.696	13.201	3.83	14.940	13.201	13.18
	17.473	19.141	8.72	20.562	19.141	7.42
	22.342	28.581	21.83	26.292	28.581	8.01
trapezoidal	6.433	9.104	29.34	9.080	9.104	0.27
	10.203	13.201	22.71	14.401	13.201	9.09
	14.681	19.141	23.30	20.720	19.141	8.25
	18.928	28.581	33.77	26.716	28.581	6.53
rectangular	6.305	9.104	30.75	9.121	9.104	0.19
	10.354	13.201	21.57	14.979	13.201	13.47
	14.512	19.141	24.19	20.994	19.141	9.68
	18.014	28.581	36.97	26.061	28.581	8.82
circular	5.801	9.104	36.28	9.070	9.104	0.37
	9.609	13.201	27.21	15.024	13.201	13.81
	13.676	19.141	28.55	21.384	19.141	11.72
	16.407	28.581	42.60	25.654	28.581	10.24

Martínez (2011) presenta la fórmula mejorada propuesta por Tullis, Amanian y Waldron para el cálculo del coeficiente de descarga (Cd) basado en investigaciones realizadas en el Utah Water Research Laboratory (UWRL). El coeficiente de descarga es función de la carga del vertedero H, el ángulo de apertura α y la altura del vertedero P.

$$Cd = a + b * \left(\frac{H}{P}\right) + c * \left(\frac{H}{P}\right)^2 + d * \left(\frac{H}{P}\right)^3 + e * \left(\frac{H}{P}\right)^4 \quad (16)$$

Los valores de a, b, c, d y e, según ángulo de apertura se muestra en la Tabla 6:

Tabla 6. Valores de los coeficientes a, b, c, d y e, según ángulo de apertura

a (°)	a	b	c	d	e
6	0.49	-0.24	-1.20	2.17	-1.03
8	0.49	1.08	-5.27	6.79	-2.83
12	0.49	1.06	-4.43	5.18	-1.97
15	0.49	1.00	-3.57	3.82	-1.38
18	0.49	1.32	-4.13	4.24	-1.50
25	0.49	1.51	-3.83	3.40	-1.05
35	0.49	1.69	-4.05	3.62	-1.10

Fuente: Martínez (2011)

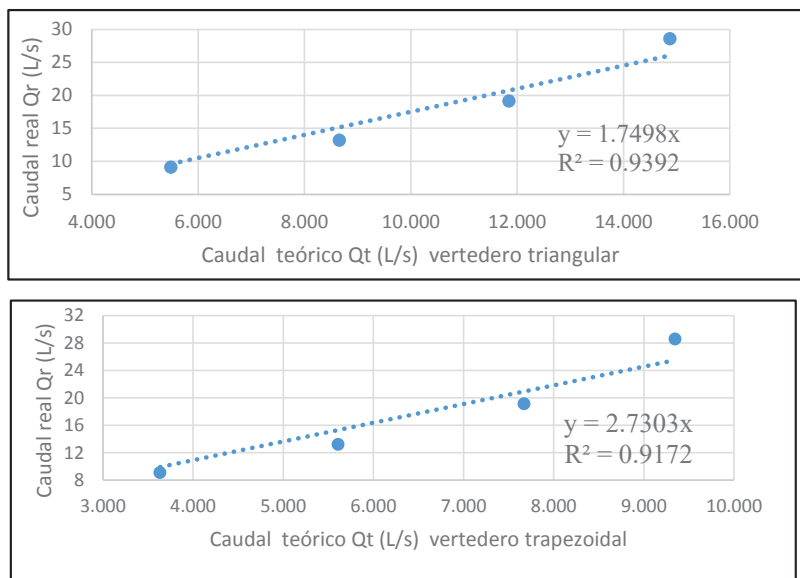
La fórmula del coeficiente de descarga tiene algunas restricciones para vertederos con ángulos menores que 6° o mayores que 35°. Los coeficientes de descarga corregidos por la fórmula general caudal teórico, para generar las ecuaciones calibradas del coeficiente de descarga en función de la relación H/P, se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Relación H/P según el caudal y vertedero ensayado.

Vertedero laberinto	Q (L/s)	H/P (cm)
triangular	9.104	0.220
	13.201	0.295
	19.141	0.365
	28.581	0.430
trapezoidal	9.104	0.188
	13.201	0.255
	19.141	0.325
	28.581	0.385

Con los resultados de Cd obtenidos, se calcula los caudales teóricos Qt y se compararon linealmente con los caudales reales Qr, antes calibrados. En la Figura 6, se muestra la gráfica en función del caudal teórico y caudal real, en los vertederos laberinto triangular y trapezoidal, de la cual se obtiene el factor de calibración (k).

Figura 6. Comparación lineal de los caudales teóricos y caudales reales en vertedero laberinto triangular y trapezoidal



Con el factor de calibración (k), se generan las formula calibradas del coeficiente de descarga, con las cuales, se calcula el valor del caudal teórico rectificado, para compararlo con el caudal real y calcular su error.

Fórmula rectificada para vertedero laberinto tipo triangular:

$$Cd = 0.8761 + 2.3989 * \left(\frac{H}{P}\right) - 5.5419 * \left(\frac{H}{P}\right)^2 + 3.5425 * \left(\frac{H}{P}\right)^3 \quad (17)$$

$$Ql = \frac{2}{3} * \left(0.8761 + 2.3989 * \left(\frac{H}{P}\right) - 5.5419 * \left(\frac{H}{P}\right)^2 + 3.5425 * \left(\frac{H}{P}\right)^3\right) * L * \sqrt{2g} * H^{1.5} \quad (18)$$

Fórmula rectificada para vertedero laberinto tipo trapezoidal:

$$Cd = 1.37 + 2.4137 * \left(\frac{H}{P}\right) - 9.4752 * \left(\frac{H}{P}\right)^2 + 7.9440 * \left(\frac{H}{P}\right)^3 \quad (19)$$

$$Ql = \frac{2}{3} * \left(1.37 + 2.4137 * \left(\frac{H}{P}\right) - 9.4752 * \left(\frac{H}{P}\right)^2 + 7.9440 * \left(\frac{H}{P}\right)^3\right) * L * \sqrt{2g} * H^{1.5} \quad (20)$$

En la **Tabla 8**, se presenta los coeficientes de descarga rectificados y en la **Tabla 9**, el porcentaje de error entre los caudales teórico y rectificado en comparación con el caudal real.

Tabla 8. Coeficientes de descarga rectificados según el tipo de vertedero

Vertedero laberinto	Cd teórico	Cd rectificado
triangular	0.6706	1.1734
	0.6815	1.1925
	0.6776	1.1857
	0.6656	1.1646
trapezoidal	0.5647	1.5419
	0.5498	1.5011
	0.5224	1.4264
	0.4938	1.3482

Tabla 9. Caudales rectificados y caudales reales, con error estimado.

Vertedero laberinto	Ot (L/s)	Qt (L/s)	Error (%)	Qt rectificado (L/s)	Qr (L/s)	Error (%)
triangular	5.483	9.104	40%	9.594	9.104	5%
	8.652	13.201	34%	15.139	13.201	15%
	11.840	19.141	38%	20.717	19.141	8%
	14.870	28.581	48%	26.020	28.581	9%
trapezoidal	3.633	9.104	60%	9.919	9.104	9%
	5.610	13.201	58%	15.316	13.201	16%
	7.670	19.141	60%	20.940	19.141	9%
	9.347	28.581	67%	25.519	28.581	11%

CALCULO Y ANÁLISIS DEL RESALTO HIDRÁULICO

En el caso del vertedero tipo rectangular sin contracciones laterales, se observó un comportamiento de flujo constante aguas abajo, las velocidades y tirantes no se alteraron en todo el recorrido del agua; por lo tanto, no cumple con los requerimientos descritos para determinar el resalto hidráulico.

Para los vertederos laberinto, se aplicaron las condiciones de Froude y la energía específica (Villón, 2009), para clasificar los flujos con respecto

al régimen de velocidad y se determinó el tipo de resalto hidráulico; en caso de no cumplimiento se descartaron, como se indica en la **Tabla 10** y en la **figura 7** se muestra la vista en planta y frontal de los vertederos laberinto trapezoidal, rectangular, triangular y circular durante los ensayos. A la pendiente del 2%, el resultado fue negativo en todos los casos, no presentándose resalto hidráulico.

Tabla 10. Clasificación del resalto hidráulico en vertederos tipo laberinto

Vertedero laberinto	Q (L/s)	Pendientes									
		0%				1%			2%		
		Fr1>1	Fr2<1	resultado	Tipo de resalto hidráulico	Fr1>1	Fr2<1	resultado	Tipo de resalto hidráulico	Fr1>1	Fr2<1
triangular	9.104	2.538	0.169	Si	Debil	3.882	0.385	Si	Oscilante	5.282	1.453
	13.201	4.553	0.222	Si	Fijo	4.540	0.464	Si	Fijo	4.202	1.621
	19.141	6.766	0.322	Si	Fijo	6.245	0.601	Si	Fijo	8.837	2.214
	28.581	7.784	2.438	No	-	7.042	3.038	No	-	8.785	2.985
trapezoidal	9.104	2.873	0.198	Si	Oscilante	4.942	0.613	Si	Fijo	11.262	1.922
	13.201	4.556	0.340	Si	Fijo	5.214	0.508	Si	Fijo	8.252	1.738
	19.141	6.512	0.293	Si	Fijo	7.446	0.640	Si	Fijo	10.805	2.021
	28.581	6.582	1.671	No	-	7.720	2.183	No	-	6.091	2.231
rectangular	9.104	3.298	0.369	Si	Oscilante	6.207	1.754	No	-	9.999	3.033
	13.201	6.123	0.916	Si	Fijo	8.318	2.254	No	-	10.396	2.419
	19.141	10.904	2.304	No	-	15.750	2.691	No	-	11.681	2.817
	28.581	14.185	2.526	No	-	13.741	2.665	No	-	14.736	3.197
circular	9.104	3.394	0.275	Si	Oscilante	3.682	1.353	No	-	6.402	1.917
	13.201	4.916	0.726	Si	Fijo	5.922	1.566	No	-	8.806	2.066
	19.141	6.893	1.943	No	-	6.995	2.115	No	-	7.943	2.482
	28.581	10.707	2.792	No	-	7.596	2.932	No	-	6.984	2.895

(-):sin resultados



Figura 7. Vista en planta y frontal de los vertederos laberinto trapezoidal, triangular rectangular y circular.

CALCULO Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Se calcularon las energías en los tirantes Y1 y Y2 del resalto hidráulico (Villón, 2009), se compararon ambas energías y se determinó el porcentaje de disipación, obteniendo disipación de energía en todos los vertederos laberinto, en flujos que recorren un canal horizontal (pendiente 0%); cuando el canal se inclina a pendiente de 1%, los vertederos que funcionan como disipadores de energía son los

vertederos laberinto triangular y trapezoidal. Para pendientes mayores de 1%, ningún vertedero tipo laberinto generó resalto hidráulico, por lo tanto, no se generó disipación de energía. En la Figuras del 8 a 10 se muestran los perfiles de flujo para caudales 9.104, 13.201 y 19.141 L/s con pendiente de 0 y 1%, observándose el resalto hidráulico y la disipación de energía.

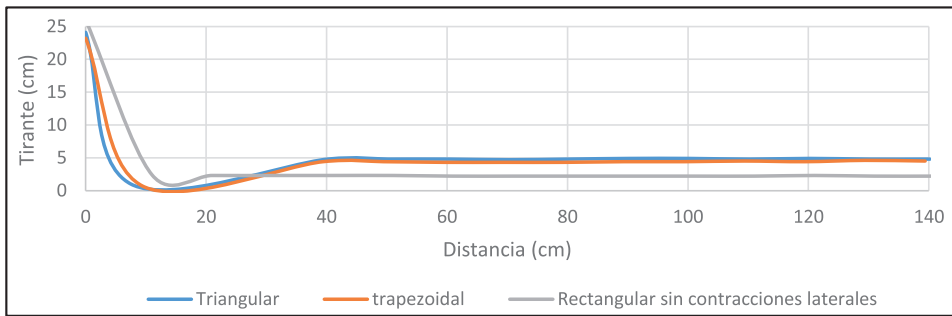
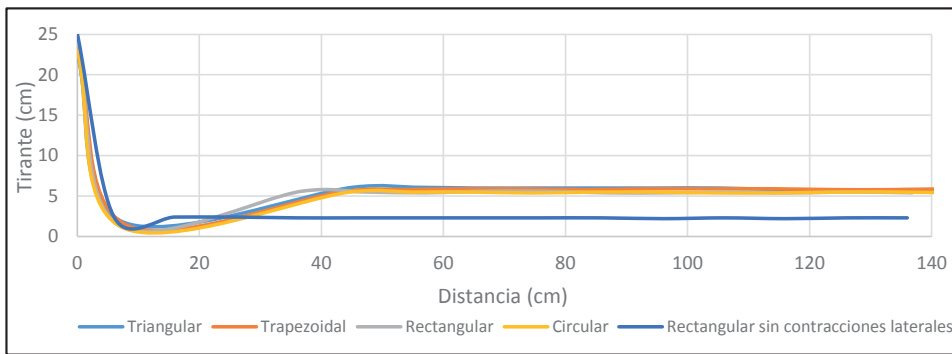
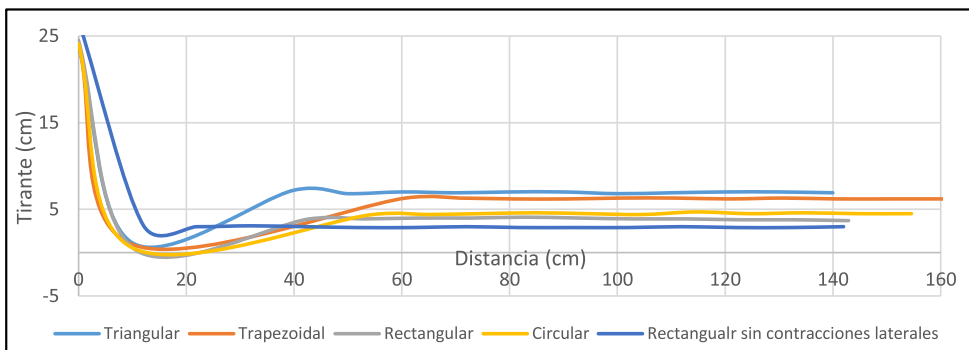


Figura 8. Comportamiento del flujo aguas abajo de los vertederos con pendiente de 0 y 1% para un caudal de 9.104 L/s.



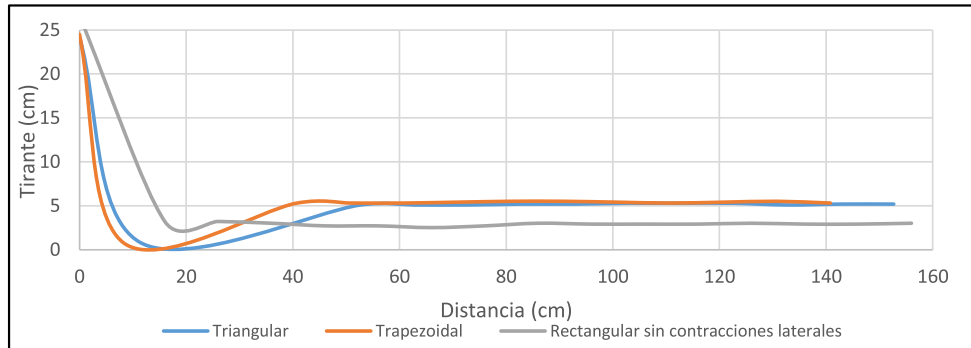


Figura 9. Comportamiento del flujo aguas abajo de los vertederos con pendiente de 0 y 1% para un caudal de 13.201 L/s.

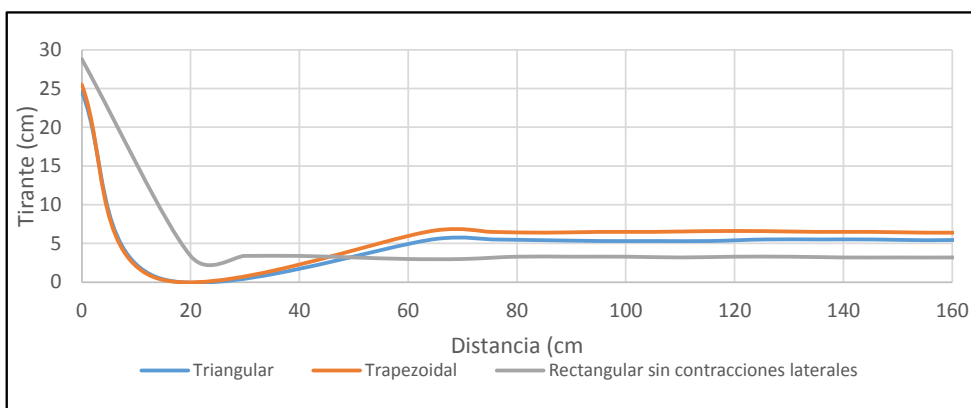
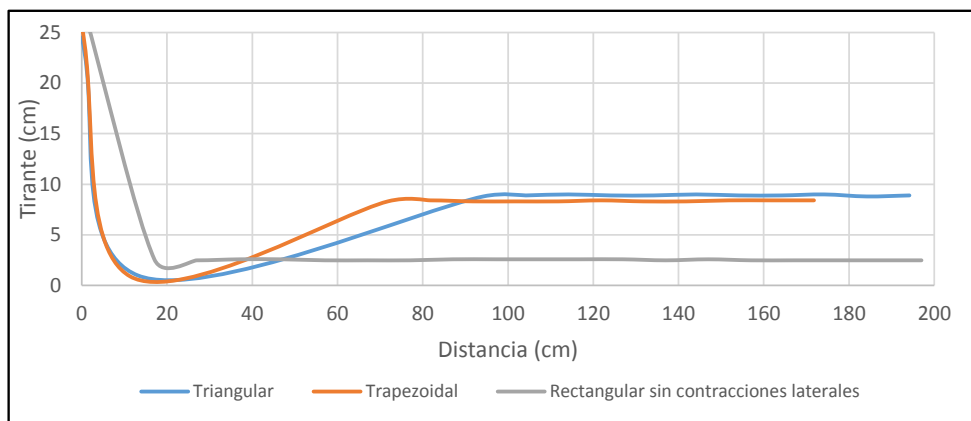


Figura 10. Comportamiento del flujo aguas abajo de los vertederos con pendiente de 0 y 1% para un caudal de 19.141 L/s.

CONCLUSIONES

Se determinó las características geométricas de cuatro prototipos de vertederos laberinto y un vertedero rectangular; en su diseño, se consideró, los criterios del número y ancho de ciclos, longitud de cresta del vertedero, ángulo de apertura entre las paredes del ciclo, longitud de la pared larga del vertedero y la altura de la pared del vertedero tipo laberinto, fabricados de acero de 5 mm de espesor.

De los ensayos se obtuvo:

- La calibración del rotámetro del canal de pendiente variable, mediante el aforamiento con un vertedero tipo rectangular con caudales de 20 a 50 m³/h resultado caudales reales de 9.104 a 28.581 L/s.
- Considerando diferentes caudales y pendientes, se calculó los coeficientes de descarga y se desarrollaron las fórmulas de calibración de caudales sobre la base de las mediciones de los tirantes y velocidades aguas arriba, encima y aguas abajo de cada vertedero.
- Se calculó la disipación de energía, obteniendo para el vertedero laberinto triangular 11.33 y 13.67% en promedio con pendientes de 0 y 1% respectivamente, para vertedero laberinto trapezoidal 11 y 12.33% en promedio con pendientes de 0 y 1% respectivamente; para vertedero laberinto rectangular y circular 8 y 7% en promedio con pendiente 0%. Para vertedero rectangular convencional no disipo energía para pendiente de 0% y 1%; cuando se aplicó pendiente de 2% ningún vertedero disipo energía.

Comparando los resultados se concluye que hay influencia importante de la geometría hidrodinámica de los vertederos laberinto en la disipación de energía, que los vertederos tipo rectangular sin contracciones laterales para caudales y pendientes iguales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alegret, E. y Pardo, R. (2005). Diseño hidráulico de aliviaderos para presas pequeñas. Investigación en el Centro de Investigaciones Hidráulicas del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
2. Érisés, F. (2013). Estudio de la influencia de aproximaciones hidrodinámicas a los ápices de vertederos en laberinto, en su coeficiente de descarga. (Tesis título) Universidad Austral de Chile.
3. Laboratorio de Hidráulica y Mecánica de Fluidos (2017). Universidad Privada Antenor Orrego. Av. América Sur 3145 Monserrate. Trujillo, Perú.
4. Martínez, R. 2011. Evaluación experimental de los coeficientes de gasto utilizados en fórmulas de vertederos en diferentes condiciones de operación. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería. Perú. Recuperado de: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/827>
5. Medina, A. y Sifontes, S. (1992). Comportamiento hidráulico del aliviadero del proyecto Yacambù (Tesis de grado). Universidad Católica Andrés Bello. Venezuela. Recuperado de: <http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAE3203.pdf>
6. Rodríguez, M. (2015). Metodología para el diseño hidráulico de vertedores de laberinto (Tesis de grado). Universidad Autónoma de México. México. Recuperado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/8763/1/tesis.pdf>.
7. Villón, M. (2009). Hidráulica de canales. Lima, Perú. Ediciones Villón.