

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE ORIFICIOS EN CANALES CON PENDIENTE VARIABLE

Claudia P. Campuzano Ochoa, Luis A. Chávez Henao y Jorge A. Naranjo Mesa
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

RESUMEN

Para fines de aforo, un vertedero invertido funciona como un orificio y, por su geometría, permite el fácil barrido de sedimentos, lo cual facilita su mantenimiento y asegura su confiabilidad. El estudio del coeficiente de descarga para una estructura de este tipo permitió obtener curvas de calibración satisfactorias y escalables froudeanamente. La solución analítico-experimental para el problema está determinada por la forma geométrica del orificio, la sección del canal y otras variables físicas como la lámina de agua, características del flujo de aproximación, etc. La efectividad de la solución depende del número de variables consideradas. Los resultados experimentales indicaron que las variables más relevantes para representar el fenómeno son la altura del orificio B, la altura de la lámina de agua inmediatamente aguas arriba del vertedero Y_i , el ángulo de apertura del orificio triangular y la gravedad. Los experimentos fueron realizados en el laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Minas.

ABSTRACT

As a flow meter device, an inverted weir operates like an orifice, and due to its geometry it allows an easy swept of sediments which facilitates its maintenance and adds reliability in measurements. The study of the discharge coefficient for this type of hydraulic structure allowed to obtain adequate and Froudian-scalable rating curves. The analytical-experimental solution of the problem is determined by the geometry of the orifice, the channel cross section, and other physical variables as the hydraulic head, characteristics of the approaching flow, etc. The effectiveness of the solution depends upon the quantity of variables involved. Our results indicated that the height of the orifice B, the height of the flow immediately upstream of the spillway Y_i , the opening angle of the triangular orifice, and the acceleration of gravity were the most relevant variables for this phenomena. The experiments were carried out at the hydraulics laboratory of the School of Mines.

1. INTRODUCCIÓN

Dada la importancia que tiene para la Hidráulica el estudio de estructuras que permitan medir de forma eficiente el caudal, como es el caso de los vertederos y compuertas, este trabajo tiene como objetivos introducir el vertedero invertido como una estructura de aforo, analizar su comportamiento como orificio, plantear las ecuaciones de calibración, en función de las variables geométricas e hidráulicas de la estructura, con el propósito final de permitir aforar sin descalibrarse por la acumulación de sedimentos. Por su condición de funcionamiento, esta estructura llegar a ser, una herramienta útil para la solución de problemas prácticos actualmente presentes en estructuras de aforo.

Si se aprovecha el conocimiento adquirido acerca de los vertederos convencionales y se diseña una estructura de geometría similar, pero en forma invertida, se generaría un orificio que, al darle paso al fluido, también le daría paso a los sedimentos.

Las soluciones analítico - experimentales presentadas en este trabajo, representan comportamientos reales específicos; sin embargo, cuando se realicen nuevos experimentos sobre el tema, se deben verificar los resultados obtenidos a la luz del escalamiento Froudeano y de la distorsión en el número de Strouhal - Levi que domina la mecánica vortical.

2. MONTAJE Y DESCRIPCIÓN DE LOS VERTEDEROS

El trabajo experimental del presente estudio fue realizado en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, el cual cuenta con la

infraestructura necesaria para el estudio, construcción y calibración de los vertederos bajo condiciones de caudal y pendiente variable.

Descripción del canal: se trata de un canal prismático con pendiente variable de sección rectangular de 0.40 m de ancho, 6.20 m de largo y 0.60 m de altura, construido en lámina de acrílico con uniones de acero. Al lado del apoyo móvil encontramos un tanque piezométrico, el cual se utiliza para disipar la energía del agua y crear las condiciones necesarias para obtener mediciones más precisas. A la salida del canal se encuentra un tanque de aquietamiento provisto de una malla disipadora y un vertedero testigo que permite el cálculo de la descarga según la siguiente ecuación:

$$Q = 0.2712 H^{1.707} \quad (1)$$

donde H es la altura de la lámina de agua en el canal (cm) y Q es el caudal (l/s).

Características de los vertederos. En lámina de acrílico de 0.5 cm de espesor, se construyeron, cuatro vertederos triangulares invertidos, dos de 30° y dos de 45°; uno grande y otro pequeño para poder modelarlos con caudal ahogado, o sea a presión y con caudal no ahogado, o sea libre. Las dimensiones de los vertederos se observan en la Tabla 1 y la Figura 1.

Los vertederos se colocaron perpendiculares al fondo del canal. Se utilizó un limnómetro de aguja para tomar datos de superficie del agua y del fondo del canal y un limnómetro de dos agujas, el cual se encuentra en el tanque piezométrico del vertedero y trabaja por conductividad del agua, dando una mejor precisión en las mediciones.

TABLA 1. Dimensiones de los Vertederos Invertidos.

VERTEDERO	ÁNGULO θ (grados)	ANCHO DEL CANAL b (cm)	ANCHO EFFECTIVO b_v (cm)	ALTURA H (cm)	ALTURA DE APERTURA B (cm)
1	45	40	20	60	25.5
2	45	40	36	60	44.8
3	30	40	12	60	21.5
4	30	40	26	60	46.7

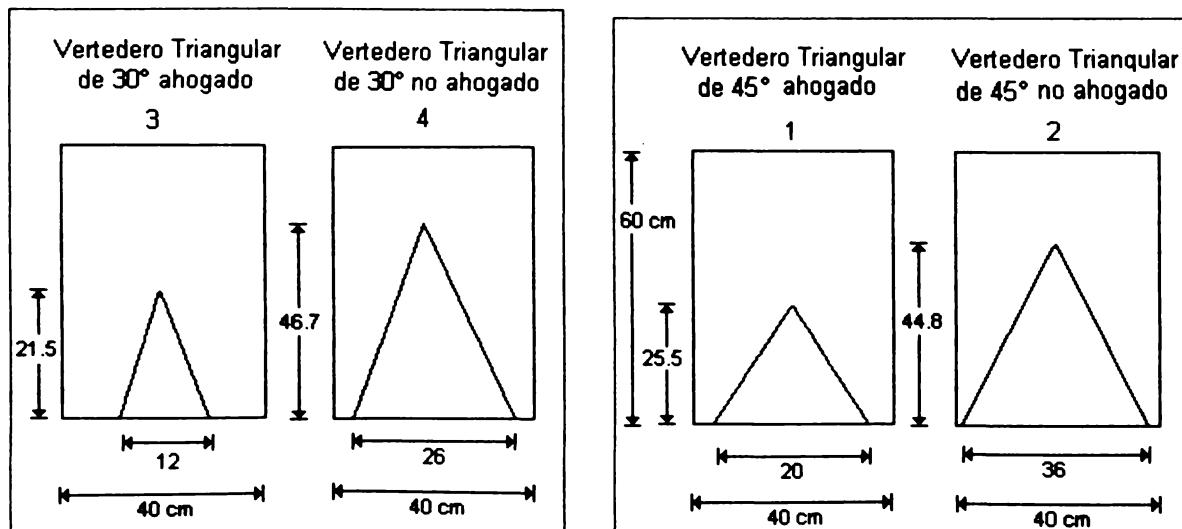


FIGURA 1. Dimensiones de los Vertederos Invertidos.

3. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN CON LOS ORIFICIOS

La parte experimental se realizó de tal forma que se pudiera observar el comportamiento de los orificios para diferentes pendientes en el canal de aproximación.

El estudio se dividió en tres etapas principales: en la primera etapa se hicieron las mediciones necesarias para realizar el modelamiento matemático del flujo a través de los orificios; en la segunda etapa se implementaron las ecuaciones respectivas del modelo matemático. La tercera etapa consistió en observar el comportamiento de los orificios con respecto al arrastre de sedimentos.

Las variables medidas fueron las siguientes (Figura 2):

Y_1 : Altura de la lámina de agua inmediatamente aguas arriba de la estructura.

Y_2 : Altura de la lámina de agua aguas arriba de la estructura.

Y_b : Altura de la lámina de agua en el vertedero testigo.

X_1 : Distancia desde la estructura hasta la posición del limnímetro para medir Y_2 .

X_3 : Longitud del resalto hidráulico para los orificios ahogados y del remanso para orificios no ahogados.

λ : Longitud de la onda diamante producida aguas abajo de la estructura.

V_1 : Velocidad del flujo en la sección 1.

F_1 : Número de Froude en la sección 1.

F_2 : Número de Froude en la sección 2.

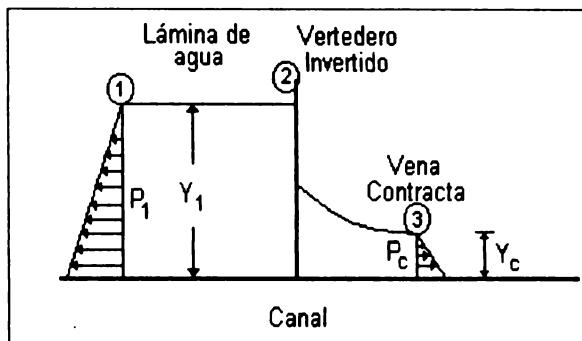


FIGURA 2. Sección longitudinal del canal indicando las estaciones de muestreo y la distribución de presiones.

4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS TEÓRICO.

Un vertedero invertido es una estructura de control que se utiliza como aforador de caudales y funciona como una estructura autolavante. La estructura puede funcionar como aforador a superficie libre si $B > Y_i$ (caudal no ahogado) comportándose como una obstrucción lateral en un canal, o a flujo confinado, si $B < Y_i$ (caudal ahogado) trabajando como orificio; B es la altura del orificio y Y_i la altura de la lámina de agua inmediatamente aguas arriba del vertedero (Figura 3). La experimentación se llevó a cabo para caudales menores de 80 l/s.

Para la solución analítica del caudal en función de las variables (B , Y_i , θ , V_i), es necesario verificar que, en el vértice superior del orificio ($B = Y_i$), la ecuación para caudal ahogado sea igual a la ecuación para caudal no ahogado.

Se suponen condiciones ideales utilizando criterios de hidráulica de canales como la ecuación de conservación de la energía (ecuación de Bernoulli) y la ecuación de continuidad (White, 1983; Chow, 1959).

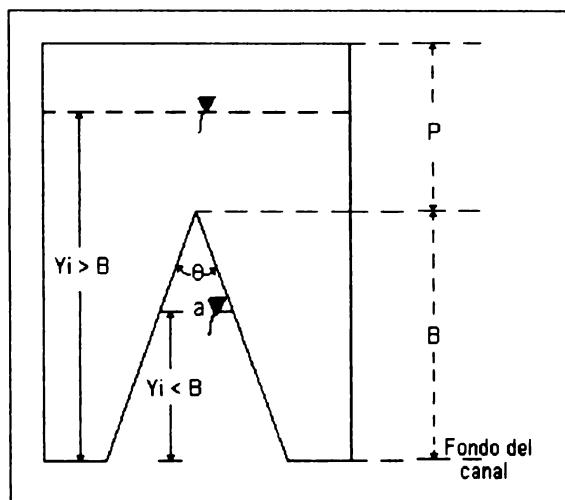


FIGURA 3. Condiciones del flujo para los caudales ahogado, Q_{ahogado} ($Y_i > B$) y no ahogado, $Q_{\text{no ahogado}}$ ($Y_i < B$).

Determinación de las ecuaciones para Caudal ahogado, (Q_{ahogado}) y Caudal no ahogado, ($Q_{\text{no ahogado}}$). Se entiende por caudal ahogado el correspondiente a un nivel de flujo, aguas arriba, mayor que el nivel máximo del orificio ($Y_i > B$), y como caudal no ahogado, el correspondiente al nivel de flujo aguas arriba, por debajo del nivel máximo del orificio ($Y_i < B$), ver Figura 3.

A partir del análisis matemático, se dedujo una ecuación tanto para el caudal ahogado como para el caudal no ahogado. La deducción de las ecuaciones parte de la aplicación de la ecuación de conservación de energía entre una sección aguas arriba, (estación 1) y el orificio del vertedero (estación 2), según se indica en la Figura 2. Aplicando la ecuación de energía, en forma diferencial, entre las secciones 1 y 2 y asumiendo que $P(y) = P_{\text{atm}}$, se obtiene:

$$Q = 2\tan\phi \left[B \int \sqrt{V_1^2 + 2g(Y_1 - Y)} dy - \int Y \sqrt{V_1^2 + 2g(Y_1 - Y)} dy \right]$$

Resolviendo la ecuación diferencial y evaluando entre 0 y B, se obtiene la expresión (2) para el caudal ahogado, y

$$Q_{\text{ahogado}} = 2\tan\phi \left[\frac{B}{3g} (V_1^2 + 2gY_1)^{3/2} + \frac{1}{15g^2} (V_1^2 + 2g(Y_1 - B))^{5/2} - \frac{1}{15g^2} (V_1^2 + 2gY_1)^{5/2} \right] \quad (2)$$

$$Q_{\text{noahogado}} = 2\tan\phi \left[-\frac{B}{3g} \left(V_1^3 - (V_1^2 + 2gY_1)^{3/2} \right) + \frac{Y_1 V_1^3}{3g} + \frac{V_1^5}{15g^2} - \frac{1}{15g^2} (V_1^2 + 2gY_1)^{5/2} \right] \quad (3)$$

Coefficientes de descarga. Dado que las ecuaciones (2) y (3) tienen varios monomios, se asignó un coeficiente de descarga para cada monomio y se resolvieron las ecuaciones resultantes para cada caudal.

- **Caudal ahogado.** Para el análisis matemático del coeficiente de descarga correspondiente al caudal ahogado, se introdujeron los coeficientes de descarga y se hicieron los siguientes reemplazos:

$$\begin{aligned} X &= (V_1^2 + 2gY_1) \\ Y &= V_1^2 + 2g(Y_1 - B) \end{aligned} \quad (4)$$

La ecuación resultante es:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ahogado}} &= 2\tan\phi C_d I \frac{B}{3g} X^{3/2} + 2\tan\phi C_d \Delta \frac{1}{15g^2} Y^{5/2} \\ &\quad - 2\tan\phi C_d \Delta' \frac{1}{15g^2} X^{5/2} \end{aligned}$$

Se simplificó la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$\sum_{i=1}^N \left[Q_i - (A_0 X_i^{3/2} + B_0 Y_i^{5/2} - C_0 X_i^{5/2}) \right]^2 = f(A_0, B_0, C_0) \quad (5)$$

evaluando la misma ecuación entre B y Y₁ se obtiene la expresión (3) para caudal no ahogado:

Derivando en forma parcial la ecuación anterior e igualando a cero, se obtiene:

$$\begin{aligned} A_0 &= C_d I \frac{2\tan\phi}{3g} B \\ B_0 &= C_d \Delta \frac{2\tan\phi}{15g^2} \\ C_0 &= C_d \Delta' \frac{2\tan\phi}{15g^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Los coeficientes de descarga Cd correspondientes al caudal ahogado se muestran en las Tablas 2 y 3.

- **Caudal no ahogado.** Para determinar el coeficiente de descarga para el caudal no ahogado, se introdujeron coeficientes de descarga en cada monomio y se simplificó la ecuación (3) mediante los siguientes reemplazos:

$$\begin{aligned} X &= V_1^3 (5gB - V_1^2 - 5gY_1) \\ Y &= (V_1^2 + 2gY_1)^{3/2} (5gB - V_1^2 - 2gY_1) \end{aligned} \quad (7)$$

La ecuación resultante es:

$$Q_{\text{noahogado}} = -C_d L \frac{2}{15} \frac{\tan\phi}{g^2} X + C_d T \frac{2}{15} \frac{\tan\phi}{g^2} Y$$

La ecuación anterior se transforma en:

$$\sum_{i=1}^N [Q_i - (A_0 X_i + B_0 Y_i)]^2 = f(A_0, B_0) \quad (8)$$

Derivando la ecuación (8) en forma parcial e igualando a cero, se obtiene:

$$A_0 = Cd_L \frac{2\tan\phi}{15g^2}$$

$$B_0 = Cd_T \frac{2\tan\phi}{15g^2} \quad (9)$$

Los coeficientes de descarga obtenidos se muestran en las Tablas 4 y 5.

TABLA 2. Coeficientes de descarga para el vertedero ahogado de 45°.

Pendiente (%)	A ₀	B ₀	C ₀	Cd _L	Cd _T	Cd _{L'}
0	0.003088	0.00015	0.000196	0.42973626	0.253034	0.341557441
2	0.003258	0.00019	0.000222	0.45348184	0.331484	0.385846963
4	0.003468	0.00026	0.000252	0.4826621	0.449616	0.437834853
6	0.002944	6.9E-05	0.000168	0.40970519	0.120451	0.292285804
8	0.002873	1.5E-05	0.000153	0.39979473	0.025324	0.265319782
10	0.003306	0.00022	0.000229	0.46009392	0.384908	0.399021309
12	0.003912	0.00038	0.000320	0.54443512	0.667814	0.557042164

TABLA 3. Coeficientes de descarga para el vertedero ahogado de 30°.

Pendiente (%)	A ₀	B ₀	C ₀	Cd _L	Cd _T	Cd _{L'}
0	0.001548	0.000075	0.000107	0.393235	0.200591	0.286739
2	0.001647	0.000102	0.000125	0.418344	0.274121	0.336288
4	0.001689	0.000108	0.000131	0.428913	0.289239	0.353393
6	0.001783	0.000140	0.000148	0.452831	0.375052	0.397463
8	0.001646	0.000099	0.000124	0.418133	0.266696	0.332524
10	0.001602	0.000086	0.000116	0.406930	0.230613	0.310893
12	0.001419	0.000040	0.000086	0.360369	0.108668	0.231929

TABLA 4. Coeficientes de descarga para el vertedero no ahogado de 45°.

Pendiente (%)	A ₀	B ₀	Cd _L	Cd _T
0	-0.000678	0.00034	1.179763	0.58908247
2	0.000153	0.00022	-0.265748	0.38191866
4	0.000060	0.00024	-0.104806	0.41527883
6	0.000028	0.0002	-0.049399	0.35477874
8	-0.000016	0.00018	0.028266	0.31866754
10	-0.000084	0.00018	0.145361	0.31700857
12	-0.000047	0.00016	0.081307	0.2831841

TABLA 5. Coeficientes de descarga para el vertedero no ahogado de 30°.

Pendiente (%)	A ₀	B ₀	Cd _L	Cd _T
0	-0.004199	0.00023	11.28666	0.610979
2	-0.000145	0.00022	0.389866	0.579462
4	-0.000205	0.00027	0.552121	0.727305
6	-0.000368	0.00021	0.990181	0.556422
8	-0.000291	0.00019	0.781658	0.500916
10	-0.000393	0.00017	1.055332	0.455819
12	-0.000338	0.00014	0.907374	0.367592

- Regresiones múltiples.** Se realizaron regresiones múltiples no lineales para determinar el caudal en función de la altura de la lámina en inmediaciones del vertedero invertido (Y_1), de la pendiente del canal (S_0), y de la apertura (B) y el ángulo (ϕ) del orificio.

- La primera regresión múltiple se realizó, para ver el comportamiento de las variables antes mencionadas. Los resultados de esta primera regresión se incluyen en la Tabla 6.

TABLA 6. Resultados de la Primera Regresión Múltiple (RM1).

VERTEDERO INVERTIDO	PRIMERA REGRESIÓN MÚLTIPLE (RM1)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	ERROR CALCULADO
No ahogado de 45°	$Q \text{ (RM1)} = 1.6640 (Y_1)^{0.499} (B)^{0.517} (S_0)^{-0.060}$	$R^2 = 0.9751$	0.09010
Ahogado de 45°	$Q \text{ (RM1)} = 2.3260 (Y_1)^{0.739} (Y_1 - B)^{0.021} (S_0)^{0.010}$	$R^2 = 0.9729$	0.01298
No ahogado de 30°	$Q \text{ (RM1)} = 0.5560 (Y_1)^{1.401} (B)^{-0.015} (S_0)^{-0.105}$	$R^2 = 0.8726$	0.05933
Ahogado de 30°	$Q \text{ (RM1)} = 1.3070 (Y_1)^{0.649} (Y_1 - B)^{0.064} (S_0)^{0.001}$	$R^2 = 0.9577$	0.00762

- La segunda regresión múltiple se realizó utilizando las variables obtenidas por análisis dimensional (White, 1983), así:

$$Q = f(Y_1^\alpha, g^\beta, B^\gamma, \tan\phi^\delta, S_0^\epsilon)$$

donde Q es el caudal [$L^3 T^{-1}$], Y_1 es la altura de la lámina de agua inmediatamente aguas arriba de la estructura [L], g es la gravedad terrestre [$L T^{-2}$], B es la altura del orificio [L], ϕ es la mitad del ángulo del orificio, S_0 es la pendiente del canal.

Reemplazando unidades se tiene:

$$L^3 T^{-1} = L^\alpha L^\beta T^{-2\beta} L^\gamma$$

Resolviendo para tiempos se obtiene

$$\beta = \frac{1}{2}$$

Resolviendo para longitudes se obtiene
 $\alpha = 5/2 - \gamma$.

La expresión resultante para el caudal es

$$Q = Y_1^{\frac{5}{2}-\gamma} g^{\frac{1}{2}} B^\gamma \tan\phi^\delta S_0^\epsilon \quad (10)$$

Organizando se obtiene:

$$Q = Y_1^2 \sqrt{gY_1} \left(\frac{B}{Y_1} \right)^\gamma \tan\phi^\delta S_0^\epsilon \quad (11)$$

Los resultados se aprecian en la Tabla 7.

- La tercera regresión múltiple se realizó eliminando la pendiente de la regresión anterior debido a que se observa que ésta no es muy influyente en la regresión, los resultados se indican en la Tabla 8.

TABLA 7. Resultados de la Segunda Regresión Múltiple (RM2).

VERTEDERO INVERTIDO	SEGUNDA REGRESIÓN MÚLTIPLE (RM2)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	ERROR CALCULADO
No ahogado de 45°	$Q(RM2) = 53965718.1 (gY_1)^{1/2} (Y_1)^2 (B/Y_1)^{2.001}$ $(\tan\phi)^{22.0941} (S_0)^{-0.0595}$	$R^2 = 0.9855$	0.09074
Ahogado de 45°	$Q(RM2) = 1.2784 (gY_1)^{1/2} (Y_1)^2 (B/Y_1)^{1.6766} (\tan\phi)^{1.8424}$ $(S_0)^{0.0110}$	$R^2 = 0.9978$	0.01330
No ahogado de 30°	$Q(RM2) = 0.4229 (gY_1)^{1/2} (Y_1)^2 (B/Y_1)^{1.0988} (\tan\phi)^{0.6477}$ $(S_0)^{-0.1046}$	$R^2 = 0.8915$	0.06011
Ahogado de 30°	$Q(RM2) = 0.0863 (gY_1)^{1/2} (Y_1)^2 (B/Y_1)^{1.6510} (\tan\phi)^{-0.4212}$ $(S_0)^{0.0015}$	$R^2 = 0.9972$	0.01481

TABLA 8. Resultados de la Tercera Regresión Múltiple (RM3).

VERTEDERO INVERTIDO	TERCERA REGRESIÓN MÚLTIPLE (RM3)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	ERROR CALCULADO
No ahogado de 45°	$Q(RM3) = 61318092.14 (gY_1)^{1/2} (Y_1)^2 (B/Y_1)^{2.0136}$ $(\tan\phi)^{22.0681}$	$R^2 = 0.9847$	0.09199
Ahogado de 45°	$Q(RM3) = 1.2473 (gY_1)^{1/2} (Y_1)^2 (B/Y_1)^{1.6785}$ $(\tan\phi)^{1.8490}$	$R^2 = 0.9975$	0.01404
No ahogado de 30°	$Q(RM3) = 0.5135 (gY_1)^{1/2} (Y_1)^2 (B/Y_1)^{1.1891}$ $(\tan\phi)^{0.6270}$	$R^2 = 0.8798$	0.06356
Ahogado de 30°	$Q(RM3) = 0.0859 (gY_1)^{1/2} (Y_1)^2 (B/Y_1)^{1.6510} (\tan\phi)^{-0.4211}$	$R^2 = 0.9972$	0.01488

Bandas y Error: Para el cálculo de las bandas (Coleman, et al, 1989; Dudewiccz, 1989; Bhattacharyya, et al, 1977), se aplicó una confiabilidad del 95%; estas bandas solo se aplicaron a las regresiones de tipo potencial, para lo cual se utilizó:

$$Q = c Y_1^n$$

Sacando logaritmos a ambos lados de la ecuación y haciendo

$$\begin{aligned} Y &= \ln(Q) & b &= \ln(c), \\ a &= n, & X &= \ln(Y_1), \end{aligned}$$

$$\text{se obtiene: } Y = b + a X$$

Para las regresiones de tipo multipotencial ($y = D x_1^a x_2^b x_3^c$), en vez de hallar unas bandas, se encontraron los errores obtenidos a partir del cálculo de las regresiones multipotenciales, con una confiabilidad del 95%. Igual que en el caso anterior, se realizó el mismo procedimiento para linealizar la función.

Frecuencia de los vórtices. Por medio de la relación de Strouhal - Levi (Levi, 1989; Chow, 1959; White, 1983), se determina la frecuencia de los vórtices como:

$$f = \frac{2\pi}{T} = \frac{V}{L} \quad (12)$$

Utilizando las expresiones obtenidas de la tercera regresión múltiple (RM3), resulta la ecuación general para la frecuencia de los vórtices así:

$$f = \frac{2\pi}{T} = \frac{Q(\text{RM3}) \cos\phi}{b Y_1 B} \quad (13)$$

Escalamiento (Levi, 1989)

Escala de longitudes:

$$\frac{L_M}{L_P} = \lambda \quad (14)$$

Escala de velocidades:

$$\frac{V_M}{V_P} = \sqrt{\frac{L_M}{L_P}} = \sqrt{\lambda} \quad (15)$$

Escala de tiempos:

$$\frac{T_M}{T_P} = \frac{V_P}{V_M} \frac{L_M}{L_P} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \lambda = \sqrt{\lambda} \quad (16)$$

Se concluye que las ecuaciones de la tercera regresión múltiple (RM3) varían su escala según la relación

$$N = \sqrt{\lambda} \quad (17)$$

Mientras la estructura es mayor, se hace más ineficiente para barrido de sedimentos, porque los vórtices pierden intensidad.

Pérdidas. Aplicando la ecuación de energía entre las secciones 1 y 3 (en la vena contracta) indicadas en la Figura 2 se obtiene (Chow, 1959; White, 1983; Domínguez, 1959):

$$Z_1 + Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_C + Y_C + \frac{V_C^2}{2g} + h_F$$

$$h_F = Z_1 + Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} - Z_C - Y_C - \frac{V_C^2}{2g} \quad (18)$$

Para determinar las pérdidas de energía, h_F se realizaron dos ensayos para pendiente 0% y dos ensayos para pendiente 6%. Para construir la Tabla 9 se utilizaron todas las mediciones, información que se considera útil para otros posibles estudios de la estructura.

TABLA 9. Cálculo de Pérdidas de energía en la estructura.

DESCRIPCIÓN	PENDIENTE 0%	PENDIENTE 6%	
Caudal, Q (l/s)	19.537	23.618	20.986
Altura de la lámina de Agua, Y ₁ (cm)	46.13	62.28	51.94
Área de la lámina de agua, A ₁ (cm ²)	1845.2	2491.2	2077.6
Velocidad de la lámina de agua, V ₁ (m/s)	0.106	0.095	0.101
Altura Vena Contracta, Y _c (cm)	17.70	19.22	19.60
Distancia a la Vena Contracta, X _c (cm)	6.5	7.0	7.0
Área de la Vena Contracta, A _c (cm ²)	88.50	81.69	89.38
Velocidad en la Vena Contracta, V _c (m/s)	2.208	2.891	2.348
Altura Valle de la onda, (Y _v) (cm)	1.66	1.75	2.05
Distancia al Valle de la onda (X _v) (cm)	45.3	49.7	44.6
Altura en el nodo (Y _m) (cm)	2.38	2.29	3.11
Distancia al nodo (X _m) (cm)	96.2	110.7	109.5
Longitud de la Onda (l) (cm)	203.6	244.0	259.6
Longitud del Vórtice (L _{vort}) (cm)	45.3	49.7	44.6
Froude en la Vena Contracta (F _c)	1.68	2.11	1.69
PÉRDIDAS, h _f (m)	0.0364	0.0051	0.0471
			0.1245

Contracción completa o incompleta. Se determina si la contracción es completa o incompleta, así (Domínguez, 1959):

Si L' > 10 L_c Contracción completa
Si L' < 10 L_c Contracción incompleta

donde L_c es la longitud de la vena contracta,

$$L' = \frac{5 B \cos\phi}{\sqrt{1 + \cos^2 \phi}} \quad (19)$$

Comparando L' con 10 L_c, se obtiene que la contracción es completa.

Fuerzas sobre la estructura. Aplicando la ecuación de momentum en las secciones 1 y 2 indicadas en la Figura 4 (White, 1983; Chow, 1959; Domínguez, 1959), se tiene:

$$F_f = \rho g Y_1 A_1 - \rho g Y_c A_c - \rho Q (V_c - V_1) \quad (20)$$

Tomando de la Tabla 9 el mayor caudal para las pendientes de 0% y 6%, se obtiene:

Pendiente 0%: F_f = 1440.29 N
Pendiente 6%: F_f = 2077.93 N

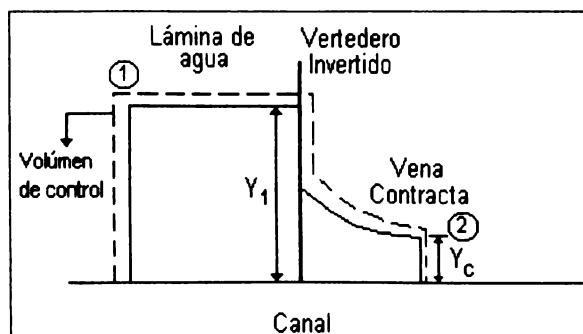


FIGURA 4. Volumen de control sobre la estructura.

Inversión de la vena. Un curioso fenómeno que se presenta en las venas líquidas es la inversión, que consiste en el cambio de forma que van experimentando a medida que se alejan del orificio. Se observa que los ángulos se van biselando y que el proceso de deformación continúa indefinidamente, Figuras 5 y 6.

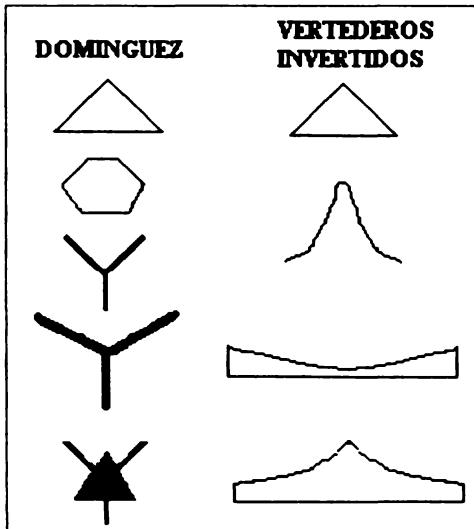


FIGURA 5. Inversión de la vena de la Literatura (Domínguez, 1959) e Inversión de la vena de la estructura en estudio. Corte transversal.

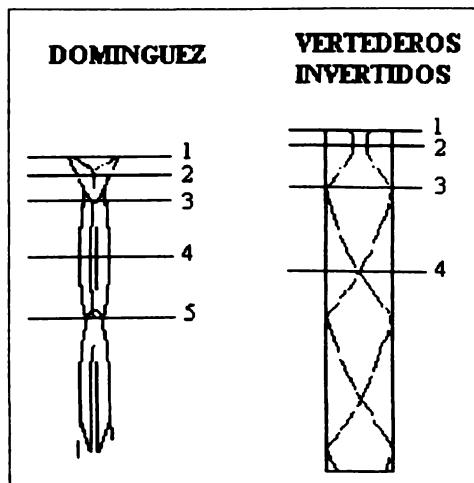


FIGURA 6. Vista en planta del chorro a la salida del orificio, tanto para el orificio de la literatura (Domínguez, 1959) como para el de la estructura en estudio.

5. CONCLUSIONES

- Como estructura de control, el vertedero triangular ahogado es mucho más eficiente que el no ahogado, lo cual es probado por la estabilidad de las regresiones, la estrechez de las bandas de

incertidumbre, los altos coeficientes de correlación, los coeficientes y exponentes de los ajustes muy semejantes, los coeficientes de dragado parciales y únicos muy estables para variaciones amplias de pendiente ($\leq 10\%$).

- El vertedero invertido ahogado funciona como una estructura de control, con cambio de régimen subcrítico a supercrítico.
- Los flujos no ahogados ni siquiera cambian de régimen al paso por la compuerta, y las curvas de calibración son más inseguras, variables y dispersas.
- Las fórmulas de aforo globales, son muy útiles por ser generales y fáciles de emplear. Las regresiones múltiples con o sin pendiente son confiables, pero no se ve por qué recomendarlas a la luz de la simplicidad y confiabilidad de las anteriores. La fórmula analítica para el vertedero ahogado es de cálculo laborioso y por lo tanto poco práctica; su estudio en el laboratorio debe continuarse. Sus coeficientes son muy estables, aunque particulares y valen $\frac{2}{3}$ de lo propuesto en la literatura para orificios rectangulares.
- Las fuerzas sobre la estructura son muy altas comparativamente con lo que sucede con la compuerta rectangular de fondo del laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional, sede Medellín, (aproximadamente el doble) y esto debe tenerse en cuenta para el diseño y correcta instalación de la estructura.
- Aguas arriba de la estructura, los experimentos visuales con gravas, arenas y finos mostraron, en todos los casos, alta eficiencia de barido de sedimentos, pero la superficie lisa del canal y la estrechez

de este contribuían a esta eficiencia; en otras condiciones no se puede todavía asegurarla. La película muestra los altos riesgos de la socavación en el fondo del canal en inmediaciones del orificio.

- La estructura no ahogada produce vórtices más frecuentes y se muestra más autolimpiante, pero la forma de estimar el caudal es incierta; los vórtices en flujo ahogado resultaron menos frecuentes (aproximadamente de $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{4}$ de la frecuencia de los formados en flujo no ahogado).
- Es una estructura de fácil construcción (aunque la parte estructural debe estar diseñada para soportar las fuerzas ejercidas por el fluido).
- En un canal natural, el transporte de sedimentos de gran tamaño puede ocasionar la obstrucción del orificio de la estructura, así como el deterioro de la misma.
- Por los análisis obtenidos, la estructura debe trabajar ahogada para obtener una relación confiable para el caudal.

6. RECOMENDACIONES

- Para la toma de datos, es importante que el nivel de flujo en el vertedero, se haya estabilizado; por lo tanto, se debe esperar un tiempo prudencial para así garantizar que el nivel de la lámina de agua sobre el vertedero esté estable.
- Se recomienda que la estructura siempre trabaje a flujo confinado debido a que las estructuras correspondientes a los caudales ahogados son las que permiten mejores fórmulas de aforo.
- En el instante en que el flujo pasa por el orificio su velocidad aumenta, pudiendo crear problemas de socavación tanto lateral como en el fondo del canal. Por esta razón, es necesario tener en cuenta un riguroso diseño del canal en el punto de colocación del vertedero que garantice la estabilidad de la estructura.
- Este trabajo se enfocó a estructuras de orificio triangular, sin querer decir que no se puedan trabajar con orificios de diferente sección.
- Aunque la estructura montada sobre el canal en acrílico, se comporta como una estructura autolavante, se espera que el paso de sedimentos se produzca también cuando se instale en un canal natural donde la rugosidad es diferente. En este sentido, se propone estudiar el comportamiento de la estructura en un canal natural.
- Se recomienda estudiar el caso en que la estructura cumpla las funciones tanto de vertedero en su parte superior, como de orificio en su parte inferior, esto sería una buena solución en el caso de que se trabaje con vertederos invertidos pequeños, donde el caudal es ahogado y exista un caudal mayor al caudal que el orificio sea capaz de evacuar, para lo cual se requeriría de la acción vertedora para eliminar el caudal excedente.
- También se puede continuar este trabajo como una práctica de laboratorio particularizada a estos cuatro orificios y sus respectivas condiciones; para otros tipos de orificios deberá realizarse la experimentación completa como se indica en este trabajo.

7. REFERENCIAS

- BHATTACHARYYA, G., JOHNSON, R. Statistical Concepts and Methods. Ed. John Wiley and Sons. United States of America, 1977.
- CHOW, V. T. Hidráulica de Canales Abiertos. Ed. McGraw Hill. Santafé de Bogotá, Colombia, 1959.
- COLEMAN, H. W., STEELE, W. G. Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers. Ed. John Wiley and Sons, Inc. United States of America, 1989.
- DOMINGUEZ S, F. J. Hidráulica. 3a. edición. Ed. Universitaria. Santiago de Chile, 1959.
- DUDEWICZ, E., MISHRA, S. Modern Mathematical Statistics. Ed. John Wiley and Sons, Inc. Singapore, 1989.
- LEVI, E. El agua según la ciencia. Ediciones Castell Mexicana S.A. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México, 1989.
- WHITE, F. M. Mecánica de fluidos. Ed. McGraw Hill. España, 1983.

