

Vertedero lateral, soluciones teóricas verificadas experimentalmente y validadas con base en el análisis dimensional

Lateral weirs, theoretical solutions experimentally verified and validated based on dimensional analysis

FERNANDO GONZÁLEZ CASAS

Tecnólogo en Topografía, Ingeniero Civil, magíster en Recursos Hidráulicos. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: fgonzalezc@udistrital.edu.co

EDUARDO ZAMUDIO HUERTAS

Ingeniero Civil, especialista en Estadística, magíster en Recursos Hidráulicos. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: ezamudioh@udistrital.edu.com

CRISTIAN ANDRÉS CORZO RIVERA

Tecnólogo en Construcciones Civiles e Ingeniero Civil de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: cacorzor@udistrital.edu.co

Fecha de recepción: 15 de agosto de 2013

Clasificación del artículo: reflexión

Fecha de aceptación: 1 de noviembre de 2013

Financiamiento: Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Palabras clave: canal abierto, estructura hidráulica, vertedero lateral, análisis dimensional, soluciones teóricas, soluciones experimentales.

Key words: Open channel, hydraulic structures, lateral weirs, dimensional analysis, theoretical solutions, experimentally solutions.

RESUMEN

Algunos métodos de cálculo en el flujo espacialmente variado generan incertidumbre por la variabilidad de la formulación. En el caso de vertederos laterales de sección constante en canales

prismáticos con descarga decreciente, algunas de las fórmulas difieren en su forma y resultados, por la naturaleza y desarrollo de los cálculos.

Por lo tanto, en este artículo se estudian soluciones para unificar criterios, con ayuda del análisis

dimensional, mediciones de laboratorio y modelos teóricos de investigaciones realizadas en Chile, Italia y Colombia.

En esta publicación se emplea el teorema π de Vaschy-Buckingham, que utiliza los principios del análisis dimensional para la solución de problemas físicos.

ABSTRACT

Some methods of calculation in Spatially Varied Flow generate uncertainty by the variability of the formulation. In the case of lateral weirs constant

section in prismatic channels with decreasing discharge, some of these formulas differ in their form and results, from the nature and development of the calculations.

Therefore, this paper explores solutions to unify criteria, with the help of dimensional analysis, laboratory measurements and theoretical models of research carried out in Chile, Italy and Colombia.

This publication uses the π of Vaschy-Buckingham theorem, which uses the principles of dimensional analysis to the solution of physical problems.

* * *

INTRODUCCIÓN

Los vertederos laterales, también conocidos como aliviaderos, son aberturas o escotaduras que se hacen en una de las paredes o taludes de un canal, su función es evacuar el exceso de caudal o desviar el flujo hacia otro canal.

En la figura 1 se aprecia el esquema en planta, vista frontal y perspectiva característico de un vertedero lateral de longitud L. Las variables típicas de un vertedero lateral son las siguientes (González, 2000):

L= longitud del vertedero.

s= umbral, barrera o altura del vertedero.

T= ancho interno o útil del canal. En algunas fórmulas corresponde a “b”, que es el ancho máximo.

Q_0 = caudal de entrada antes de cruzar por el vertedero.

Q_1 = caudal de salida no vertido después de cruzar el vertedero.

Q_1-Q_0 = caudal vertido en la escotadura o vertedero lateral.

X= abscisa variable en la escotadura del vertedero.

Y= altura de la lámina de agua en el punto ‘X’.

Z= altura del agua sobre la cresta del vertedero, se denomina carga del vertedero.

El flujo espacialmente variado se caracteriza por una descarga no uniforme resultante de la adición o extracción del fluido a lo largo del curso del flujo. El agua agregada o extraída origina variación en el contenido de la energía o del *momentum* del flujo, lo que complica el análisis de este tipo de movimiento, porque los resultados con descarga creciente son diferentes a los obtenidos con descarga decreciente (Domínguez, 1999).

El flujo espacialmente variado con descarga decreciente se puede tratar como una derivación, en la cual el agua vertida no afecta la cota de la energía específica a lo largo del canal frente a la estructura de vertimiento (Salamanca, 1970).

Este concepto se aplica en el análisis de vertederos laterales para evacuación de excesos de flujo en canales, donde se asegura un flujo decreciente. La estructura de derrame es usualmente un largo corte instalado que sigue el costado del canal. Pruebas de laboratorio en este tipo de estructuras se han efectuado por Engels durante los años 1917 a 1920, (González, 2000); por su parte, Coleman-Smith efectuaron mediciones en 1923, (González, 2000), y Forcheimer realizó ensayos en 1930 (González, 2000). Teórica y experimentalmente, De Marchi-

rante de 1934 a 1947 probó que la altura de energía a lo largo de la cresta del vertedero es esencialmente constante y que el perfil del flujo es curvo frente al vertedero, y se eleva así en el sentido del movimiento para régimen subcrítico y descende en el caso de flujo supercrítico (González, 2000).

Domínguez (1955), fundamentado en la teoría de DeMarchi, optimizó el procedimiento de cálculo con el método de aproximaciones sucesivas que facilita el diseño de vertederos laterales.

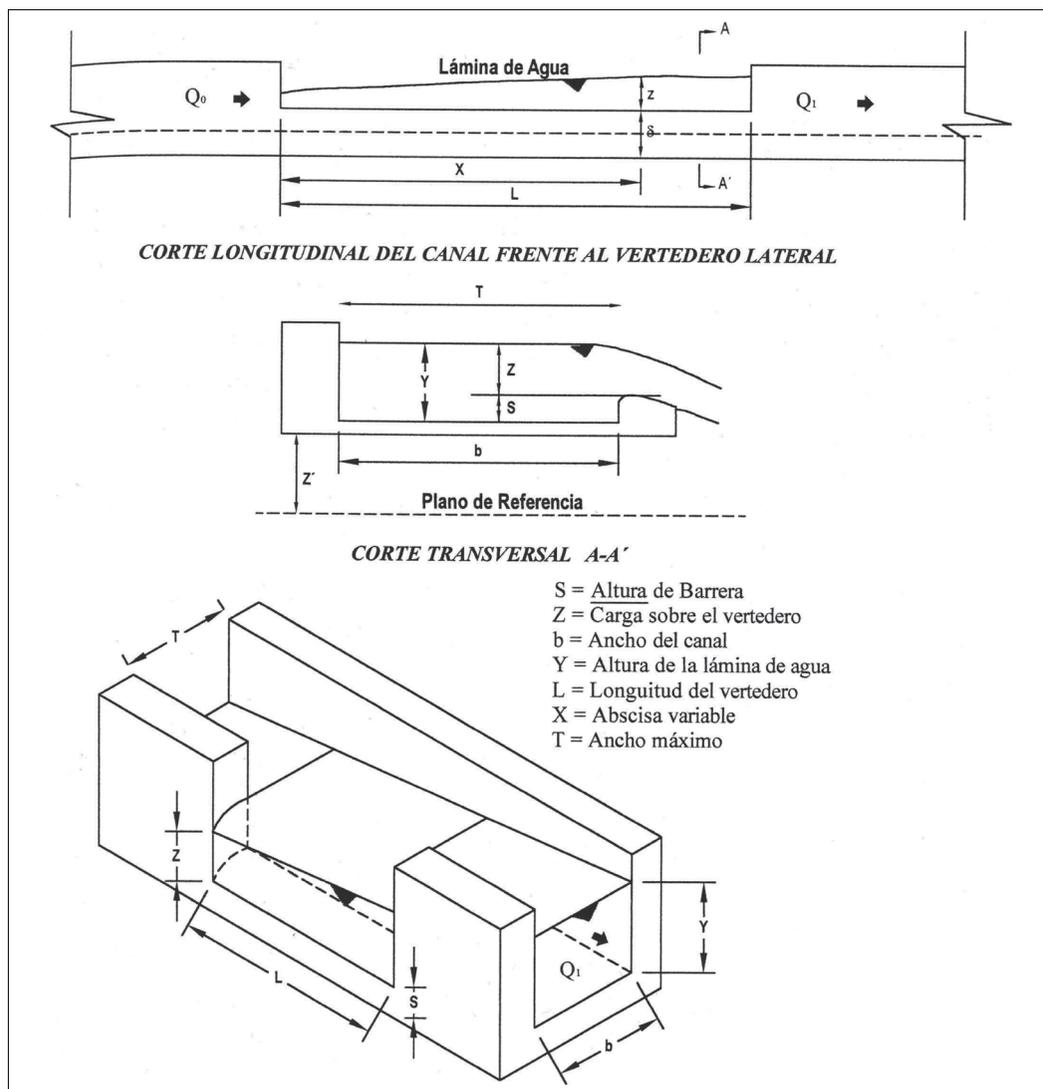


Figura 1. Cortes vista frontal y perspectiva de un veredero lateral

Fuente: González (2000).

Salamanca (1970) presenta el estudio teórico sobre vertederos laterales, mediante integración de las ecuaciones diferenciales del flujo espacialmente variado con descarga decreciente. Con este método se tiene un procedimiento de cálculo y se encuentran fórmulas teóricas basadas en el análisis matemático de aplicación fácil e inmediata (Salamanca, 1970).

González (2000) entre 1998 y 2000 verificó experimentalmente las ecuaciones de Salamanca en canales de sección transversal rectangular, construyendo y operando modelos hidráulicos de fondo fijo y verificando la validez de las hipótesis teóricas del profesor Luís María Salamanca, dado que pensar la teoría del flujo espacialmente variado permite obtener una estructura que, en caso de una considerable reducción del ancho del canal a lo largo del vertedero lateral, es apreciablemente económica en comparación con las obtenidas por procedimientos empíricos y semiempíricos.

Los modelos hidráulicos que reproducen sistemas de flujo a superficie libre, como canales, ríos y estuarios, generalmente se usan para resolver problemas de variación de niveles y cambios de patrones de flujo debidos a modificaciones del cauce o emplazamiento de estructuras dentro del flujo. Sin embargo, empleando las técnicas de modelación hidráulica se resuelven otros problemas con flujo a superficie libre, entre los que se encuentran las estructuras hidráulicas tratadas aisladamente. En estos estudios no interesa considerar las deformaciones que pueden sufrir las fronteras del cauce, por lo que son de fondo fijo, es decir, sin analizar el transporte de sedimentos y los fenómenos asociados de sedimentación y socavación, las ecuaciones de Forcheimer, De Marchi, Domínguez y Salamanca corresponden a expresiones para estimar el caudal líquido únicamente, lo que significa que no tienen en cuenta el transporte de sedimentos.

Por otra parte, si se tiene un prototipo, este se puede representar a escala verificando las leyes

de similitud geométrica, cinemática y dinámica (Streeter, 2002), que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas entre prototipo y modelo. No obstante, si se quiere comprobar una ley o hipótesis y no se tiene un prototipo (Acosta, 1975), se permite la construcción de la estructura en la que se recurre a la técnica experimental como herramienta para la verificación de la hipótesis (Chow, 1994). González (1998-2000) aplicando técnicas experimentales construye y opera una estructura de vertimiento lateral que permite la evaluación de las ecuaciones propuestas por Salamanca en 1970.

MÉTODO DE DEMARCHI-DOMÍNGUEZ

Con base en el principio de la conservación de la energía, De Marchi considera las siguientes hipótesis (Salamanca, 1970):

- Canal rectangular y prismático horizontal.
- Vertedero lateral corte de ancho constante y arista viva.
- Energía específica constante a lo largo del vertedero.
- Vertedero con adecuada aireación de la napa con descarga libre.
- Coeficiente de corrección de energía cinética =1.
- No se considera el rozamiento en el canal-vertedero.

La solución de De Marchi permite calcular la abscisa desde el borde del vertedero (x), en función de la energía específica a la entrada del vertedero (E), de la altura de la barrera (s), la profundidad del agua (Y), el coeficiente de descarga del vertedero (m) y el ancho del canal rectangular (b). En la ecuación (1) se presenta la relación matemática para estimar la abscisa variable desde el borde del vertedero (x), y en la ecuación (2), la función para

reflexión |

calcular el gasto o caudal (dQ_v) en una distancia diferencial a lo largo del vertedero (dx).

$$x = \frac{b}{m} \left[\frac{2E-3s}{E-s} \sqrt[2]{\frac{E-Y}{y-s}} - 3 \arcsen \left(\sqrt[2]{\frac{E-y}{y-s}} \right) \right] \quad (1)$$

$$dQV = m \sqrt{2g} \sqrt[2]{[y-s]^3} dx \quad (2)$$

Donde

dQ_v = gasto o caudal en el vertedero en una longitud dx .

dx = longitud a lo largo del vertedero lateral para un caudal vertido dQ_v .

E = energía específica a la entrada del vertedero lateral.

m = coeficiente de descarga del vertedero.

s = altura de la barrera en el vertedero.

b = ancho del canal rectangular constante.

X = abscisa variable en la escotadura del vertedero.

Y = altura de la lámina de agua en el punto 'X'.

Por consiguiente, es posible construir la curva de la superficie de agua dándole valores a "y", obteniendo los correspondientes de "x", pero es necesario relacionar el caudal, por lo que la solución en este tipo de problemas, de acuerdo con De Marchi y Domínguez, consiste en resolver la ecuación (2) gráficamente o por aproximaciones sucesivas.

MÉTODO DE SALAMANCA CON VERTEDERO DE SECCIÓN CONSTANTE Y VELOCIDAD VARIABLE

Empleando el principio de la conservación de la energía, Salamanca (1970) determina las ecuaciones para vertederos laterales, con las siguientes hipótesis:

- Canal rectangular y prismático horizontal.
- Energía específica constante a lo largo del vertedero.
- Vertedero con descarga libre y borde redondeado.
- Coeficiente de corrección de energía cinética = 1.
- No se considera el rozamiento en el conjunto canal-vertedero.

Las ecuaciones de Salamanca facilitan calcular la abscisa desde el borde del vertedero (x) en función de la energía específica a la entrada del vertedero (E), de la altura de la barrera (s), la profundidad del agua (y), el coeficiente de descarga del vertedero (m) y el ancho del canal rectangular (b). En la ecuación (3) se tiene la función para obtener la abscisa desde el borde del vertedero (x), y en la ecuación (4) se presenta la relación matemática para estimar el gasto o caudal total vertido lateralmente en la estructura hidráulica (QV).

$$x = \frac{b}{m} \left(\frac{2E-3s}{E-s} \sqrt[2]{\frac{E-y}{E-s}} - 3 \arctan \arctan \sqrt[2]{\frac{E-y}{y-s}} \right) - \frac{b}{m} \left(\frac{2E-3s}{E-s} \sqrt[2]{\frac{E-y_0}{E-s}} - 3 \arctan \sqrt[2]{\frac{E-Y_0}{Y_0-S}} \right) \quad (3)$$

$$-\left(y_1 \sqrt[2]{E-y_1} \right) + \left(y_0 \sqrt[2]{E-y_0} \right) = \frac{QV}{b\sqrt{2g}} \quad (4)$$

Las ecuaciones de Salamanca se resuelven directamente a diferencia de las ecuaciones en el modelo de DeMarchi-Domínguez, que requieren solución semigráfica o por aproximaciones sucesivas.

MÉTODO EXPERIMENTAL

Fernando González Casas (2000), en su tesis de maestría titulada “Diseño construcción y operación de modelos hidráulicos para la optimización de vertederos laterales canal rectangular fase I”, efectúa la construcción de un modelo hidráulico compuesto principalmente por un canal horizontal de ancho constante, y variable, con una escotadura o vertedero lateral.

En dicho modelo se han medido el caudal, la velocidad y la profundidad hidráulicas con distintas condiciones de operación, y se han obtenido resultados satisfactorios.

- Características principales del modelo experimental.
- Canal horizontal de ancho constante igual a 0,49 m.
- Abertura lateral (vertedero altura 0,038 m, espesor pared = 0,10 m y longitud = 1,02 m).
- Coeficiente de rugosidad del canal igual a 0,012 para superficie en cemento pulida.
- Flujo subcrítico.

En los ensayos efectuados para el canal horizontal y arista viva del vertedero, se observa una diferencia máxima de 5,6% entre la energía al comienzo y al final del vertedero; en el caso de arista redondeada, esta diferencia alcanza un máximo de 12,7%. Cuando se ensaya en el canal con pendiente longitudinal de 0,00256 y arista redondeada, esta diferencia alcanza un máximo de 5,6%. Los resultados indican que las teorías para definición del caudal vertido lateralmente, basa-

das en la hipótesis de energía específica constante cuando la sección transversal del canal no cambia frente al vertedero lateral en canal rectangular, no se apartan apreciablemente de las observaciones experimentales, hecho con el cual se cumple la hipótesis de energía específica constante en la zona de vertimiento.

Para régimen subcrítico (Chow, 1994; Giles, 1999; Mott, 2006 y Peña, 2005) se verifica que el perfil de la lámina de agua es creciente frente a la escotadura del vertedero lateral, de forma que la profundidad del flujo es función de la longitud del vertedero, independientemente de que la sección transversal rectangular sea constante o variable en la zona de vertimiento.

Las mediciones efectuadas para la definición del perfil del flujo frente a la escotadura del vertedero indican que al utilizar las expresiones de Domínguez, Engels y Salamanca para canal rectangular se obtienen resultados satisfactorios si el canal es horizontal, porque las ecuaciones de Domínguez, Engels y Salamanca se basan en la hipótesis de que la diferencia entre la pendiente longitudinal del canal y la pendiente de la línea de energía es despreciable.

La comparación experimental entre el flujo en el vertedero de arista viva y arista redondeada indica, como lo sugiere la teoría consultada, que el ángulo de entrada del flujo al vertedero tiende a ser normal en ambos casos, aun cuando no se obtuvo en ninguno un ángulo de incidencia de 90°.

De acuerdo con las mediciones de laboratorio, las ecuaciones de Salamanca para definición de caudal vertido y la determinación del perfil del flujo se ajustan mejor a los datos experimentales cuando el vertedero lateral es de sección constante rectangular y velocidad media variable, siendo el régimen subcrítico.

Las evaluaciones de perfil longitudinal del flujo y del caudal vertido lateralmente, obtenidas me-

dante el empleo de las teorías de Domínguez y Salamanca, para sección transversal constante y velocidad media variable, son similares; de esta manera se ajustan bien a los datos de laboratorio. No obstante, con Domínguez se tienen diferencias menores que con Salamanca, pero es más sencillo y expedito el empleo de la teoría de Salamanca que facilita el cálculo.

Dado que el flujo en todos los ensayos se clasifica como subcrítico y la teoría de Forcheimmer (1930) se emplea únicamente en la evaluación y diseño de vertederos laterales cuando el flujo es supercrítico, no se aplicó el método de Forcheimmer en el desarrollo del proyecto de grado.

En el caso de flujo subcrítico y canal rectangular de sección transversal constante, con números de Froude menores a 0,60, la utilización de las ecuaciones de Salamanca para definición de caudal vertido lateralmente y estimación del perfil de flujo en la zona de vertimiento lleva a resultados satisfactorios, por lo que se recomienda el empleo de estas.

ANÁLISIS DIMENSIONAL Y TEOREMA π DE VASCHY-BUCKINGHAM

Cristian Andrés Corzo Rivera, integrante del semillero en investigación en hidráulica, “UDENS”, desarrolla el estudio de análisis dimensional en el proyecto de grado titulado “Determinación de curvas a dimensional es para el análisis y diseño de vertederos laterales de sección constante en canales prismáticos basado en la teoría de flujo espacialmente variado con descarga decreciente” (Corzo, 2012), que permite validar los métodos de DeMarchi-Domínguez y Salamanca.

El teorema π de Vaschy-Buckingham establece que en un problema físico en el que intervienen (n) magnitudes denominadas variables, en las que se tienen (m) dimensiones independientes, las (n) magnitudes pueden agruparse en (n-m) pará-

metros adimensionales, conformados con las variables originales (Streeter, 2002). Este teorema proporciona un método de construcción de parámetros adimensionales, incluso cuando la forma de la ecuación es desconocida (Acosta, 1975).

La ecuación por obtener requiere del conocimiento de las variables en el problema; en el caso de un vertedero lateral, el caudal vertido (Q_v) depende del ancho del canal (b), de la profundidad del agua (y), de la abscisa (x), de la aceleración de la gravedad (g) y de la altura de la barrera (s) (ver figura 1).

Se tienen para el estudio del fenómeno seis variables ($n=6$) que no son independientes porque dimensionalmente aparecen en función de la longitud (L) y el tiempo (T); por lo tanto, ($m=2$), debido a que las variables en la ecuación (3) se expresan con máximo dos dimensiones, la longitud (L) y el tiempo (T).

Según el teorema π de Buckingham, existen cuatro parámetros adimensionales para analizar el fenómeno de vertimiento, porque ($n-m$) es igual a cuatro; obsérvese que ($n=6$)y($m=2$).

En resumen:

Número de variables: 6 (Q_v ; g; b; s; x; y)

Número de dimensiones: 2 (Longitud y Tiempo)

De acuerdo con el teorema de Buckingham y operando con la aceleración de la gravedad (g) y la profundidad del agua (y) como variables repetitivas, se obtienen los cuatro parámetros adimensionales para estudiar el fenómeno. El parámetro π_1 incluye como variable no repetitiva el caudal de vertimiento (Q_v); en el parámetro π_2 la variable no repetitiva es el ancho del canal (b), y en los parámetros π_3 y π_4 las variables no repetitivas son la abscisa variable al borde del vertedero (X) y la altura de la barrera del vertedero (s), respectiva-

mente. En las ecuaciones (5), (6), (7) y (8) se presentan las relaciones matemáticas para los cuatro parámetros adimensionales π_1, π_2, π_3 y π_4 :

$$\pi_1 = Y^{x_1} g^{y_1} Qv = L^{x_1} [LT^{-2}]^{y_1} L^3 T^{-1} \quad (5)$$

$$\pi_2 = Y^{x_2} g^{y_2} b = L^{x_2} [LT^{-2}]^{y_2} L \quad (6)$$

$$\pi_3 = yx^3 g^{y_3} X = L^{x_3} [LT^{-2}]^{y_3} L \quad (7)$$

$$\pi_4 = y^{x_4} g^{y_4} s = L^{x_4} [LT^{-2}]^{y_4} L \quad (8)$$

La solución del parámetro π_1 se obtiene con base en la ecuación (5). Como π_1 es adimensional, la abscisa variable al borde del vertedero (X_1) y la profundidad del agua (y_1) están relacionadas con los exponentes en el parámetro π_1 , que de acuerdo con la teoría del análisis dimensional por ser variables linealmente independientes se resuelven como ecuaciones simultáneas; la ecuación (9) corresponde a la dimensión longitud y la ecuación (10) a la dimensión tiempo.

$$X_1 + y_1 + 3 = 0 \quad (9)$$

$$-2y_1 - 1 = 0 \quad (10)$$

Resolviendo las ecuaciones simultáneas (9) y (10), se obtienen las ecuaciones (11) y (12).

$$\left[x = -\frac{1}{2} \right] \quad (11)$$

$$\left[y = -\frac{5}{2} \right] \quad (12)$$

Al reemplazar las ecuaciones (11) y (12) en la ecuación (5), se obtiene la ecuación (13).

$$\pi_1 = \frac{Qv}{\sqrt[2]{g y^5}} \quad (13)$$

Mediante un proceso similar, las soluciones de los parámetros adimensionales π_2, π_3 y π_4 son las ecuaciones (14), (15) y (16).

$$\pi_2 = \frac{b}{y} \quad (14)$$

$$\pi_3 = \frac{x}{y} \quad (15)$$

$$\pi_4 = \frac{s}{y} \quad (16)$$

Con los datos experimentales de laboratorio y las ecuaciones en los modelos de Salamanca y De Marchi-Domínguez se estiman y miden los caudales vertidos en la estructura experimental, y para validar la bondad de las ecuaciones se calculan los parámetros adimensionales π_1, π_2, π_3 y π_4 (ver tablas 1 y 2).

Tabla 1. Agrupación de cálculos modelos de Salamanca y de DeMarchi-Domínguez y resultados experimentales

	X(m)	y(m)	ΔQv (m3/s)	π_1	π_2	π_3	π_4
	0,000	0,0810	0,00974	1,666	6,049	0	0,469
Ecuación de	0,255	0,0837	0,00748	1,179	5,854	3,047	0,454
Salamanca	0,510	0,0858	0,00513	0,760	5,711	5,944	0,443
ensayo 1	0,765	0,0875	0,00256	0,361	5,600	8,743	0,434
	1,020	0,0887	0,00000	0	5,524	11,499	0,428
	0,000	0,0842	0,01034	1,606	5,819	0	0,451
Ecuación de	0,255	0,0858	0,00786	1,164	5,711	2,972	0,443
De Marchi-	0,510	0,0869	0,00529	0,759	5,639	5,869	0,437

Continúa

	X(m)	y(m)	ΔQ_v (m3/s)	π_1	π_2	π_3	π_4
Domínguez	0,765	0,0877	0,00266	0,373	5,587	8,723	0,433
Ensayo 1	1,020	0,0880	0,00000	0	5,568	11,591	0,432
	0,000	0,0810	0,00990	1,694	6,049	0	0,469
Medición	0,255	0,0860	0,00432	0,636	5,698	2,965	0,442
experimental	0,510	0,0870	0,00250	0,358	5,632	5,862	0,437
González	0,765	0,0883	0,00104	0,143	5,549	8,664	0,43
ensayo 1	1,020	0,0880	0,00000	0	5,568	11,591	0,432
	0,000	0,0790	0,00772	1,406	6,203	0	0,481
Ecuación de	0,255	0,0813	0,00590	1,000	6,027	3,137	0,467
Salamanca	0,510	0,0831	0,00408	0,655	5,897	6,137	0,457
ensayo 2	0,765	0,0847	0,00202	0,309	5,785	9,032	0,449
	1,020	0,0859	0,00000	0	5,704	11,874	0,442
	0,000	0,0810	0,00850	1,454	6,049	0	0,469
Ecuación de	0,255	0,0820	0,00649	1,077	5,976	3,11	0,463
De Marchi	0,510	0,0840	0,00435	0,679	5,833	6,071	0,452
Domínguez	0,765	0,0840	0,00221	0,345	5,833	9,107	0,452
ensayo 2	1,020	0,0850	0,00000	0	5,765	12,000	0,447
	0,000	0,0790	0,00829	1,5100	6,203	0	0,481
Medición	0,255	0,0810	0,00640	1,095	6,049	3,148	0,469
experimental	0,510	0,0840	0,00222	0,347	5,833	6,071	0,452
González	0,765	0,0843	0,00163	0,252	5,813	9,075	0,451
ensayo 2	1,020	0,0850	0,00000	0	5,765	12,000	0,447
	0,000	0,0670	0,00933	2,565	7,313	0	0,567
Ecuación de	0,255	0,0691	0,00743	1,891	7,091	3,690	0,550
Salamanca	0,510	0,07074	0,00536	1,286	6,927	7,210	0,537
ensayo 3	0,765	0,072	0,00300	0,689	6,806	10,625	0,528
	1,020	0,07285	0,00000	0	6,726	14,001	0,522
	0,000	0,0085	0,00851	2,174	7,101	0	0,551
Ecuación de	0,255	0,0710	0,00650	1,546	6,901	3,592	0,535
De Marchi-	0,510	0,0720	0,00440	1,010	6,806	7,083	0,528
Domínguez	0,765	0,0730	0,00220	0,488	6,712	10,479	0,521
ensayo 3	1,020	0,0730	0,00000	0	6,712	13,973	0,521
	0,000	0,0670	0,00804	2,210	7,313	0	0,567
Medición	0,255	0,0690	0,00637	1,627	7,101	3,696	0,551
experimental	0,510	0,0700	0,00532	1,311	7,000	7,286	0,543
González	0,765	0,0713	0,00361	0,85	6,872	10,729	0,533

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Agrupación de cálculos modelos de Salamanca y de De Marchi-Domínguez y resultados experimentales

	X(m)	y(m)	ΔQ_v (m ³ /s)	π_1	π_2	π_3	π_4
	0,000	0,0780	0,01761	3,311	6,282	0	0,487
Ecuación de	0,255	0,0845	0,01409	2,168	5,799	3,018	0,450
Salamanca	0,510	0,0888	0,01014	1,378	5,518	5,743	0,428
ensayo 4	0,765	0,0919	0,00543	0,677	5,332	8,324	0,413
	1,020	0,0937	0,00000	0	5,229	10,886	0,406
	0,000	0,0830	0,01832	2,949	5,904	0	0,458
Ecuación de	0,255	0,0880	0,01418	1,972	5,568	2,898	0,432
De Marchi-	0,510	0,0910	0,00967	1,237	5,385	5,604	0,418
Domínguez	0,765	0,0930	0,00490	0,593	5,269	8,226	0,409
ensayo 4	1,020	0,0940	0,00000	0	5,213	10,851	0,404
	0,000	0,0780	0,01613	3,032	6,282	0	0,487
Medición	0,255	0,0850	0,01246	1,890	5,765	3,000	0,447
Experimental	0,510	0,0890	0,00891	1,204	5,506	5,73	0,427
González	0,765	0,0913	0,00593	0,752	5,367	8,379	0,416
ensayo 4	1,020	0,0940	0,00000	0	5,213	10,851	0,404
	0,000	0,0720	0,01349	3,098	6,806	0	0,528
Ecuación de	0,255	0,0765	0,01075	2,121	6,405	3,333	0,497
Salamanca	0,510	0,0796	0,00783	1,399	6,156	6,407	0,477
ensayo 5	0,765	0,0821	0,00414	0,685	5,968	9,318	0,463
	1,020	0,0836	0,00000	0	5,861	12,201	0,455
	0,000	0,0760	0,01324	2,656	6,447	0	0,500
Ecuación de	0,255	0,0790	0,01019	1,856	6,203	3,228	0,481
De Marchi-	0,510	0,0810	0,00691	1,182	6,049	6,296	0,469
Domínguez	0,765	0,0820	0,00351	0,582	5,976	9,329	0,463
ensayo 5	1,020	0,0830	0,00000	0	5,904	12,289	0,458
	0,000	0,0720	0,01198	2,751	6,806	0	0,528
Medición	0,255	0,0765	0,00918	1,812	6,405	3,333	0,497
Experimental	0,510	0,0800	0,00568	1,002	6,125	6,375	0,475
González	0,765	0,0823	0,00186	0,306	5,954	9,295	0,462
ensayo 5	1,020	0,0830	0,00000	0	5,904	12,289	0,458
	0,000	0,0760	0,01650	3,310	6,447	0	0,500
Ecuación de	0,255	0,0800	0,01344	2,372	6,125	3,188	0,475
Salamanca	0,510	0,0829	0,01001	1,616	5,911	6,152	0,458
ensayo 6	0,765	0,0849	0,00611	0,929	5,772	9,011	0,448
	1,020	0,086	0,00000	0	5,698	11,86	0,442

Continúa

	X(m)	y(m)	ΔQv (m ³ /s)	$\pi 1$	$\pi 2$	$\pi 3$	$\pi 4$
	0,000	0,0780	0,01446	2,718	6,282	0	0,487
Ecuación de	0,255	0,0820	0,01111	1,843	5,976	3,110	0,463
De Marchi-	0,510	0,0840	0,00752	1,175	5,833	6,071	0,452
Domínguez	0,765	0,0850	0,00382	0,579	5,765	9,000	0,447
ensayo 6	1,020	0,0860	0,00000	0	5,698	11,86	0,442
	0,000	0,0760	0,01345	2,698	6,447	0	0,500
Medición	0,255	0,0798	0,01055	1,873	6,140	3,195	0,476
Experimental	0,510	0,0826	0,00730	1,189	5,932	6,174	0,460
González	0,765	0,0843	0,00428	0,663	5,813	9,075	0,451
Ensayo 6	1,020	0,0856	0,00000	0	5,724	11,916	0,444

Fuente: elaboración propia.

En las tablas 1 y 2 se observa que al aplicar los parámetros adimensionales a las variables calculadas con los métodos de De Marchi-Domínguez, Salamanca y con la información experimental obtenida en el modelo físico, las diferencias son mínimas y tienen errores promedio en el intervalo 7 % a 12 %, que son típicas en pruebas y modelos hidráulicos (González, 2000 y Walpole, 1999).

CONCLUSIONES

La determinación de los rangos de estudio en cada situación permite conocer de una manera más natural el comportamiento de las variables del vertedero y canal principal.

El análisis dimensional es una herramienta poderosa para el planteamiento y la verificación de

modelos matemáticos en el estudio de fenómenos físicos y de aplicación en ingeniería.

El uso de métodos estadísticos para el manejo de datos es una herramienta útil en el comportamiento y la tendencia de estos.

Es de vital importancia dar a conocer el método desarrollado por Salamanca, debido a que cuenta con un desarrollo analítico real y efectivo.

Es posible la generación de curvas adimensionales, para los métodos de Engels y Forcheimmer, para vertederos de sección constante en canales de sección transversal variable en la zona de vertimiento, procesos que hacen parte del trabajo de González.

REFERENCIAS

González, F. (2000). *Diseño construcción y operación de modelos hidráulicos para la optimización de vertederos laterales Canal rectangular fase I*. (Tesis de maestría) Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Domínguez, F. (1999). *Hidráulica* (6ta.edición). Santiago de Chile: Universitaria.

Salamanca, L. (1970). *Estudio del Vertedero Lateral*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

- Streeter, V. (2002). *Mecánica de Fluidos* (8va. edición). México D.F.: Editorial McGraw Hill.
- Acosta, G. y Azevedo, J. (1975). *Manual de Hidráulica* (6ta. edición). México D.F.: Editorial Harla.
- Chow, T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá: McGraw Hill Interamericana.
- Corzo, C. (2012). *Determinación de curvas adimensionales para el análisis y diseño de vertederos laterales de sección constante en canales prismáticos, basado en la teoría de flujo espacialmente variado con descarga decreciente*. (Proyecto de grado) Universidad Distrital, Bogotá.
- Giles, R. (1999). *Mecánica de los fluidos e hidráulica (teoría y 75 problemas resueltos)* (2da. edición). Bogotá: McGraw Hill.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos* (6ta. edición). México D.F.: Pearson Educación.
- Peña, M. y Sotelo, G. (enero, 2005). Diseño de vertedores de canal lateral en régimen supercrítico. *Revista Tláloc AMH Asociación Mexicana de Hidráulica*, 3, 6-14.
- Myers, S. y Walpole, R. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros* (Trad. R. Cruz) (6ta.edición). México D.F.: Prentice-Hall Hispanoamericana.