

Comparación de las fórmulas del grupo de ingeniería SABO (Ministerio de Construcción de Japón) y de Autenheimer para dimensionar secciones de flujo en control de torrentes

Comparison between SABO Work Engineering (Japan Ministry of Construction) and Autenheimer equations used to determine size of flow sections on torrent control check dams

GUSTAVO RAMÍREZ¹, ANA CAROLINA SOTO²,
YAJAIRA OVALLES¹, JOSÉ LEÓN¹,
FABIOLA RIPANTI¹ y MARIBEL RIVAS³

Recibido: 09-03-09 / Aceptado: 30-03-09

1 Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Mérida, Venezuela, E-mails: gramirez@ula.ve, ovalles@ula.ve, jleong@ula.ve, ripantif@ula.ve

2 Ingeniero Forestal, Mérida-Venezuela. E-mail: anacarolina733@gmail.com

3 Geógrafo, Mérida-Venezuela, E-mail: maribelg@ula.ve

Resumen

En Venezuela, tradicionalmente se diseñan y construyen secciones de flujo de forma trapecial en diques de control de torrentes y la fórmula utilizada para su dimensionamiento ha sido la de Autenheimer; de procedencia austriaca y estructura compleja. Por su parte, el Grupo de Ingeniería SABO utiliza para tales secciones una fórmula diferente, de estructura simple, lo cual si existe una apropiada verificación experimental y la hace preferible a la de Autenheimer. A fin de determinar cuál de las ecuaciones es la de mayor conveniencia práctica para su aplicación en el dimensionamiento de las secciones de flujo de los diques de control de torrentes, se procedió a realizar verificaciones experimentales con dos modelos a escala geométrica aproximada 1:10, de diferente inclinación en las paredes de la sección de flujo y bajo dos condiciones aguas arriba del dique: **a.** completamente sedimentado o azolvado; y, **b.** sin azolvamiento. Se compararon las magnitudes de los caudales obtenidos aplicando las dos fórmulas con el gasto real y se determinó que la fórmula del grupo SABO es apropiada para el cálculo de secciones de flujo en diques de control de torrentes en nuestro país.

Palabras clave: gasto máximo, vertedero, diques, torrentes, JICA.

Abstract

In Venezuela, trapeze form has traditionally been used to calculate the flow sections on torrents control check dam and the Autenheimer equation which is of austriac origin and complex structure, to calculate its dimension. On the other hand, SABO Work Engineering uses for the same purpose, a different equation of simple structure, which is preferable to Autenheimer's if it exists appropriate experimental validation. In order to determine which equation is more practically convenient for its implementation in the structural design of stream sections of flood torrents control dikes, experimental validations were made with two geometric scale models at 1:10, having different inclinations of the flow sections walls and under two upstream of the dam conditions: **a.** completely sedimented or blocked; and, **b.** without siltation or blocking material. The magnitudes of the flows obtained were compared applying both equations with the real outcome, and it was determined that SABO Work Engineering's equation is appropriate to calculate the flow sections of torrents control check dam in our country.

Key words: maximun flow, Dike, Torrent, JICA.

1. Introducción

El sistema de corrección de torrentes incluye obras de estabilización de cauces, donde se combinan el escalonamiento de diques y obras de protección lateral. En el diseño y cálculo de los diques, el diseño de la sección de flujo está supeditado a la determinación del gasto de diseño y a consideraciones geológicas, topográficas e hidráulicas.

Las secciones de flujo de diques de control de torrentes realizan una función similar a los aliviaderos de flujo sobre la cresta en presas, es decir, conducen el flujo de crecidas por encima de la estructura. Aguilar (1990), señala que el dimensionamiento de las secciones de flujo de diques de control de torrentes, debe garantizar la evacuación tanto del caudal líquido como del sólido que transporta el cauce y considerar tales secciones: 1) como

elemento del cauce, lo cual ocurre después que se ha completado el azolvamiento con la pendiente de equilibrio formada por el material depositado; de esta forma la sección de flujo se comporta hidráulicamente como una contracción lateral; y, 2) como vertedero, durante el tiempo en el cual el aterramiento no llegue al nivel de coronación.

En general, el diseño de la sección de flujo considera la siguiente secuencia: 1) localización, determinada por consideraciones topográficas y geológicas aguas arriba y aguas abajo del dique, el ancho del cauce y la dirección de la corriente; a su vez, el centro o eje debe ser el de la sección transversal existente; 2) la sección de flujo, que generalmente es trapecial a fin de prevenir socavaciones laterales y de fondo; y, por último, 3) el dimensionamiento, el cual es muy importante ya que de ello depende la efectividad y factibilidad de la obra a construir.

Ahora bien, en Venezuela tradicionalmente se ha usado para el dimensionamiento de secciones de flujo de diques, la fórmula de Autenheimer, la cual corresponde a la fórmula de un vertedero trapecial de cresta ancha que incluye en su estructura, la velocidad de aproximación y un coeficiente “ μ ” que sintetiza los efectos de la contracción y las pérdidas de carga; el procedimiento es por tanteo y culmina cuando el gasto calculado al aplicar dicha fórmula con las dimensiones propuestas, es igual o mayor al gasto de diseño.

Por su lado, el Grupo de Ingeniería SABO (JICA, 1989) presenta para el dimensionamiento de secciones de flujo, una fórmula que no considera la velocidad de aproximación en su estructura y en la cual aparece un coeficiente “C” con un rango de variación entre 0,60 y 0,66, que no tiene calificación ni se indican los factores de los cuales depende; pero según la teoría de vertederos de cresta ancha es un coeficiente de descarga, donde se reflejan los efectos de contracción, pérdidas de carga y velocidad de aproximación. Dicho planteamiento puede ser confirmado en Aguirre *et al.* (1971), Franzini y Finnenore (1999) y Giles *et al.* (2001), al analizar la derivación del coeficiente de descarga en algunos dispositivos hidráulicos.

Se aduce que no se requiere refinamiento en la estructura y en los valores de los coeficientes que se usan en fórmulas para el dimensionamiento de secciones de flujo en diques de corrección de torrentes, y se fundamenta esta argumentación en la poca precisión con que se puede estimar el gasto

de diseño, particularmente para el caso de crecidas torrenciales; no obstante, las verificaciones experimentales permiten establecer los márgenes de precisión con que estas fórmulas pueden predecir el gasto pasante por la estructura, lo cual es un criterio de valor para el diseñador. Por otra parte, en Venezuela se han venido utilizando y proponiendo fórmulas para el dimensionamiento de las secciones de flujo sin conocer su validez a través de pruebas experimentales realizadas en el país. En este sentido, se realizaron experiencias en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes para comparar la magnitud de los gastos obtenidos al aplicar la fórmula del Grupo SABO y la de Autenheimer, con el gasto real y con la fórmula de calibración de los modelos y determinar cuál de ellas es conveniente y apropiada para el dimensionamiento de secciones de flujo de diques de control de torrentes en nuestro país.

2. Materiales y métodos

2.1 Obtención de los datos

En el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, se llevaron a cabo experimentos para obtener los datos necesarios en la aplicación de las fórmulas para el dimensionamiento de las secciones de flujo de diques. Se utilizó un canal rectangular de concreto de 10 m de largo, 0,80 m de ancho y 0,68 m de alto y, un sistema de recirculación compuesto por un par motobomba, un tanque de nivel constante de alimentación, tuberías de circulación y tanque de mediciones volumétricas.

Además, se construyeron en madera dos modelos de vertedero de cresta ancha, con sección de flujo trapecial, con inclinación en las paredes 1V:1H y 1V:1/2H, respectivamente; los cuales corresponden a estructuras similares a las utilizadas en la estabilización de cauces torrenciales, dimensionados a una escala geométrica aproximada 1:10 de acuerdo a las dimensiones del canal. No fue posible reproducir las condiciones de aproximación por las dimensiones del canal y la escala escogida. Las dimensiones de los vertederos se ilustran en la figura 1.

Para cada uno de los modelos se realizaron una serie de experimentos en dos condiciones:

1) el modelo sin aterrado y 2) el modelo azolvado o aterrado hasta el borde de la cresta de la sección de flujo, en una longitud aguas arriba del vertedero de 3 m, utilizando granzón para simular tales condiciones. En la figura 2, se observa el modelo 1V:1/2H sin aterrado y el modelo 1V:1H aterrado, descargando a máxima capacidad.

Una vez instalados los modelos en las condiciones antes descritas, se alimentó el canal con agua mediante la apertura de una válvula de control; el gasto pasante por el modelo fluye hacia el

tanque para mediciones volumétricas, de 3 m² de área, el cual dispone de un mecanismo que permite interrumpir el flujo, y de un piezómetro para hacer observaciones de un nivel inicial hasta el nivel final cuando la superficie del agua se estabiliza; el tiempo de llenado se obtiene con el cronómetro y la determinación de la carga y las profundidades se miden con una sonda de punta, de esta manera se obtuvieron todos los datos necesarios para determinar el gasto en cada experimento.

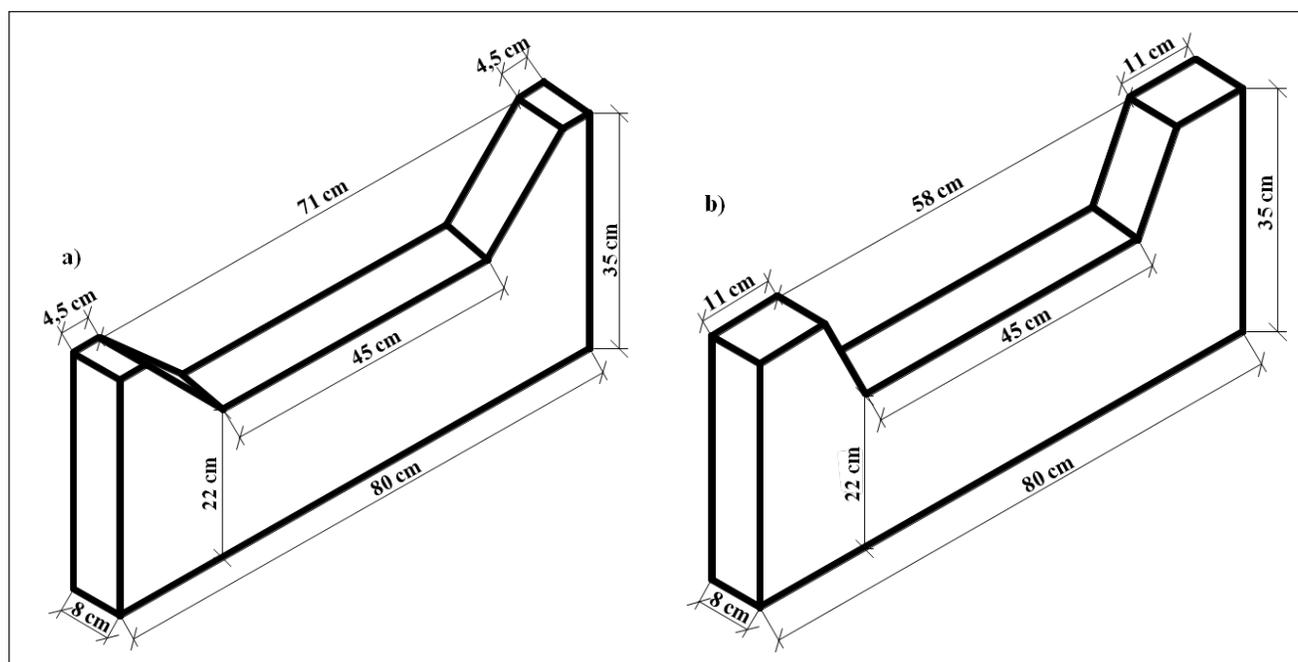


Figura 1. Dimensiones de los modelos trapeziales utilizados: a) Modelo 1V:1H y b) Modelo 1V:1/2H.

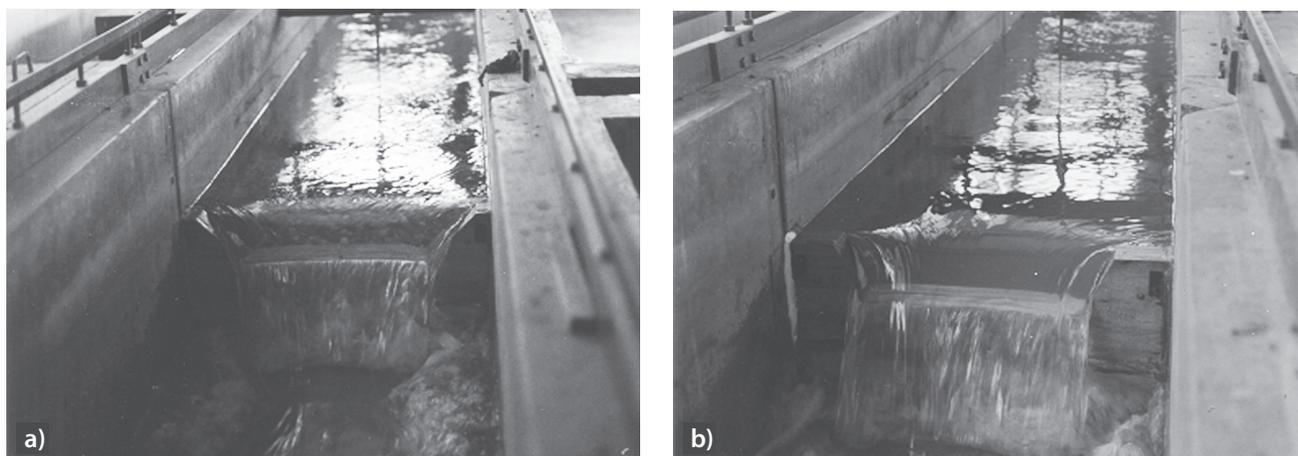


Figura 2. Descarga a máxima capacidad: a) Modelo 1V:1H aterrado y b) Modelo 1V:1/2H sin aterrado.

2.2 Estimación del gasto experimental

El gasto experimental o real, se determinó para cada uno de los experimentos realizados en diferentes condiciones de los modelos, utilizando la ecuación 1:

$$Q_E = \frac{(C_f - C_i)}{t} \times A \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

Q_E = Gasto experimental (m^3/s)

C_f = Cota final (m)

C_i = Cota inicial (m)

T = tiempo (m)

A = Área del tanque (m^2)

2.3 Calibración de los modelos y estimación de gasto de calibración

La ecuación de calibración es del tipo $Q = KH^n$, donde Q y H representan el gasto experimental (expresado en L/s) y la carga (expresada en cm), respectivamente. Aplicando una regresión de tipo potencial se obtienen las ecuaciones para cada uno de los modelos.

En la figura 3, se observan las curvas ajustadas para cada uno de los modelos, las cuales arrojaron un coeficiente de correlación mayor a 0,99, considerándose muy bueno, no obstante, es un coeficiente esperado, debido a que se está trabajando en condiciones de laboratorio que son controladas.

Para el modelo 1V:1H aterrado,

$$Q_C = 0,6732 \cdot H^{1,6402} \quad (\text{Ec. 2})$$

Para el modelo 1V:1H sin aterrar,

$$Q_C = 0,5609 \cdot H^{1,7016} \quad (\text{Ec. 3})$$

Para el modelo 1V:1/2H aterrado,

$$Q_C = 0,6291 \cdot H^{1,6318} \quad (\text{Ec. 4})$$

Para el modelo 1V:1/2H sin aterrar,

$$Q_C = 0,6183 \cdot H^{1,6402} \quad (\text{Ec. 5})$$

2.4 Estimación del gasto con la fórmula de Autenheimer

La fórmula de *Autenheimer* es la sustracción de una sección triangular a una sección rectangular y toma en cuenta la velocidad de aproximación (Ecuación 6, Hattinger, 1971):

$$Q_A = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} \left[B_U + \frac{B_O - B_U}{T_S} (T_S + h) \right] \left[(T_S + h)^{3/2} - h^{3/2} \right] - \frac{2}{5} \mu \sqrt{2g} \left(\frac{B_O - B_U}{T_S} \right) \left[(T_S + h)^{5/2} - h^{5/2} \right] \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

Q_A = Gasto obtenido con la fórmula de Autenheimer (m^3/s)

μ = coeficiente con valores entre 0,60 y 0,66

g = gravedad (m/s^2)

B_O = Ancho mayor de la sección de flujo (m)

B_U = Ancho menor de la sección de flujo (m)

T_S = Carga máxima correspondiente al gasto máximo medido volumétricamente para cada modelo (m)

h = Carga de velocidad de aproximación (m). Para el cálculo se consideró la condición de aterramiento y no aterramiento de la siguiente manera:

Para los modelos aterrados será,

$$h = \frac{V^2}{2g} = \frac{Q_e^2}{2gA^2} = \frac{Q_e^2}{2g(0,80 \cdot T_S)^2}$$

Para el modelo 1V:1H sin aterrar,

$$h = \frac{Q_e^2}{2g[0,80 \cdot (0,22 + T_S)]^2}$$

Para el modelo 1V:1/2H sin aterrar,

$$h = \frac{Q_e^2}{2g[0,80 \cdot (0,215 + T_S)]^2}$$

2.5 Estimación del gasto con la fórmula del Grupo de Ingeniería SABO

Dicha fórmula considera la forma trapecial de la sección de flujo como equivalente a la suma del gasto de una sección triangular y una sección rectangular.

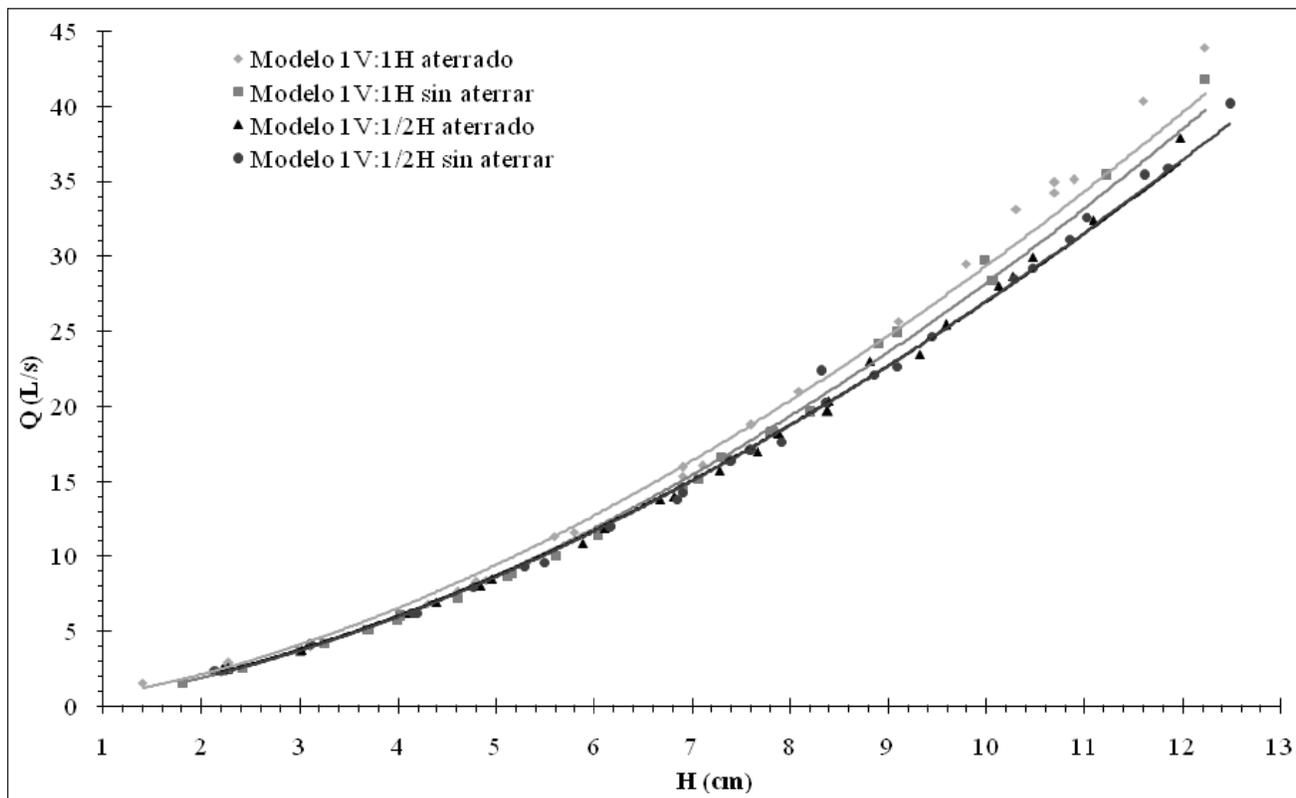
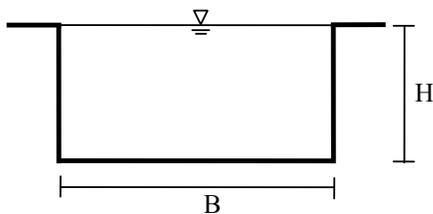


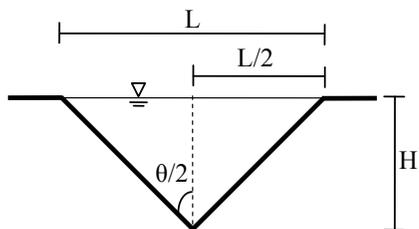
Figura 3. Curvas de ajuste obtenidas aplicando regresión potencial para cada uno de los modelos.

La fórmula teórica, para obtener el gasto en un vertedero rectangular de cresta ancha es:



$$\Rightarrow Q = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot H^{3/2}$$

Para obtener el gasto teórico en una sección triangular, utilizamos:

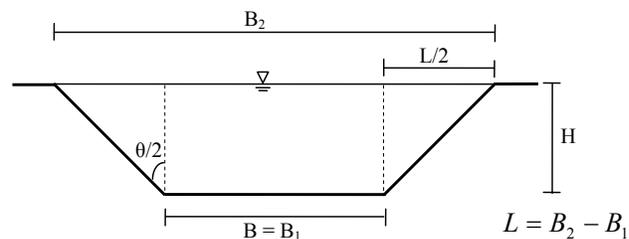


$$\Rightarrow Q = \frac{8}{15} \cdot C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot H^{5/2}$$

Partiendo de la premisa anterior, la deducción de la fórmula considera la sumatoria de los gastos de ambas secciones, por tanto,

$$Q_J = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot H^{3/2} + \frac{8}{15} \cdot C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \tan(\theta/2) \cdot H^{5/2}$$

De la figura



por tanto, $\tan(\theta/2) = \frac{L}{2H} = \frac{(B_2 - B_1)}{2H}$

Sustituyendo $\tan(\theta/2)$, tenemos:

$$Q_J = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot B_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot H^{3/2} + \frac{8}{15} \cdot C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \frac{(B_2 - B_1)}{2H} \cdot H^{5/2}$$

Sacando factor común $\frac{2}{3}C_d \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{\frac{3}{2}}$

$$Q_J = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{\frac{3}{2}} \cdot \left[B_1 + \frac{2}{5} \cdot (B_2 - B_1) \right]$$

Desarrollando,

$$Q_J = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{3}{5} \cdot B_1 + \frac{2}{5} \cdot B_2 \right)$$

Finalmente, nos queda:

$$Q_J = \frac{2}{15} \cdot C \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{\frac{3}{2}} \cdot (3 \cdot B_1 + 2 \cdot B_2) \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

Q_J = Gasto obtenido con la fórmula del Grupo SABO (m^3/s)

C = coeficiente con valores entre 0,60 y 0,66

g = gravedad (m/s^2)

H = Carga máxima correspondiente al gasto máximo medido volumétricamente para cada modelo (m)

B_1 = Ancho menor de la sección de flujo (m)

B_2 = Ancho mayor de la sección de flujo (m)

2.6 Estimación del error porcentual

Para conocer la diferencia porcentual entre los gastos calculados y los medidos experimentalmente, se procedió de la siguiente manera para cada experimento realizado en cada uno de los modelos:

Error del gasto de calibración:

$$E_C = \left(\frac{Q_C - Q_E}{Q_E} \right) \times 100$$

Error del gasto estimado según Autenheimer:

$$E_A = \left(\frac{Q_A - Q_E}{Q_E} \right) \times 100$$

Error del gasto estimado según el Grupo SABO:

$$E_J = \left(\frac{Q_J - Q_E}{Q_E} \right) \times 100$$

Para la estimación del error promedio, se tomaron los valores absolutos.

3. Resultados y discusión

Considerando que el caudal real es el obtenido experimentalmente, en los cuadros 1, 2, 3 y 4 se presentan los resultados correspondientes a los caudales obtenidos a través de la ecuación de calibración y los caudales aplicando las fórmulas de Autenheimer y Grupo SABO, con y sin aterramiento, para cada uno de los modelos.

Se observa que el caudal de calibración obtenido para cada uno de los modelos subestima significativamente con respecto al real, lo cual indica que aún cuando las formulas de calibración obtenidas tienen un coeficiente de correlación cercano a uno, el uso de estas fórmulas para el dimensionamiento de secciones de flujo no sería procedente, por cuanto los modelos no corresponden exactamente a prototipos de estructuras a construir o ya construidas.

Al observar los caudales obtenidos con la fórmula de Autenheimer y Grupo SABO, la mayoría de los valores reales son sobreestimados; sin embargo, el gasto calculado con Autenheimer se incrementa a medida que se aumenta el coeficiente (μ), ocurriendo lo mismo con el gasto del Grupo SABO pero en menor proporción.

En el cuadro 5, se muestran los errores promedios para cada uno de los modelos al comparar los diferentes gastos obtenidos con el gasto experimental; para los gastos estimados con la fórmula de calibración se obtuvieron diferencias porcentuales promedios que varían entre 2,36 y 6,35%, lo cual es esperado y aceptable.

Para los gastos estimados con la fórmula de Autenheimer el error porcentual promedio tiene mayor rango de variación (10,45 y 37,59), el cual depende del coeficiente utilizado; de manera similar ocurre para los errores promedios del Grupo SABO, variando entre 10,00 y 36,97%. No obstante, se pudo constatar que los errores porcentuales para cada uno de los experimentos, se reducen a medida que aumenta la carga hasta cierto nivel y, a partir de un nivel mínimo tienden a incrementarse levemente, esto puede interpretarse de la siguiente manera: para los valores bajos el efecto de fricción es muy elevado y para los valores altos la aparición de ciertas turbulencias en la superficie en forma de ondas, dificulta las medidas de la carga con precisión.

Cuadro 1. Valores de los diferentes caudales obtenidos para el modelo 1V:1H aterrado.

Q _E	Q _C	Q _A			Q _J		
		μ=0,60	μ=0,63	μ=0,66	C=0,60	C=0,63	C=0,66
1,55	1,17	1,78	1,87	1,96	1,63	1,71	1,79
2,25	2,45	3,38	3,55	3,72	3,20	3,36	3,52
2,85	2,58	3,62	3,80	3,98	3,36	3,52	3,69
3,95	4,31	5,68	5,97	6,25	5,36	5,63	5,89
6,20	6,81	8,67	9,11	9,54	8,15	8,56	8,96
6,80	7,36	9,34	9,80	10,27	8,75	9,19	9,63
7,60	8,23	10,34	10,86	11,38	9,68	10,17	10,65
8,25	8,82	11,05	11,60	12,15	10,32	10,84	11,35
8,39	9,12	11,38	11,94	12,51	10,65	11,18	11,71
9,44	10,38	12,80	13,44	14,08	11,98	12,58	13,17
11,59	12,00	14,75	15,48	16,22	13,68	14,36	15,04
11,30	11,33	14,04	14,74	15,44	12,97	13,62	14,27
15,30	16,00	19,22	20,18	21,14	17,79	18,68	19,57
15,90	16,00	19,33	20,29	21,26	17,79	18,68	19,57
16,00	16,76	20,07	21,07	22,08	18,57	19,50	20,43
18,75	18,74	22,41	23,53	24,65	20,57	21,59	22,62
20,95	20,77	24,67	25,91	27,14	22,59	23,72	24,84
25,60	25,19	29,54	31,02	32,50	26,95	28,29	29,64
29,50	28,39	33,14	34,80	36,46	30,07	31,57	33,07
33,10	30,86	36,01	37,81	39,61	32,45	34,07	35,69
34,90	32,80	38,05	39,95	41,86	34,31	36,02	37,74
34,20	32,80	37,92	39,81	41,71	34,31	36,02	37,74
35,08	33,81	38,97	40,92	42,87	35,27	37,04	38,80
40,35	37,45	43,14	45,30	47,46	38,73	40,67	42,60
43,90	40,85	46,75	49,09	51,43	41,93	44,03	46,12

Q_E: Caudal experimental (L/s); Q_C: Caudal de calibración (L/s); Q_A: Caudal según Autenheimer (L/s); Q_J: Caudal según SABO (L/s)

Debido a que las fórmulas de Autenheimer y del Grupo SABO son utilizadas fundamentalmente para dimensionar secciones de flujo, se realizaron las comparaciones en términos de gastos máximos pasantes, como se muestra en el cuadro 6, en la cual se evidencia que la magnitud de los errores porcentuales para un coeficiente de 0,60, en algunos modelos subestima, mientras que para un coeficiente de 0,66, los gastos se sobreestiman en un máximo alrededor del 17% para Autenheimer y de 10% para el Grupo SABO. Sin embargo, en el dimensionamiento de diques con la fórmula de Autenheimer se ha utilizado comúnmente un coeficiente promedio de 0,63, con el cual se puede observar que los errores porcentuales pueden lle-

Cuadro 2. Valores de los diferentes caudales obtenidos para el modelo 1V:1H sin aterrado.

Q _E	Q _C	Q _A			Q _J		
		μ=0,60	μ=0,63	μ=0,66	C=0,60	C=0,63	C=0,66
1,55	1,52	2,37	2,49	2,61	2,37	2,49	2,61
2,45	2,23	3,31	3,48	3,65	3,31	3,48	3,64
2,55	2,51	3,67	3,86	4,04	3,67	3,86	4,04
3,66	3,64	5,11	5,36	5,62	5,10	5,36	5,61
4,20	4,17	5,76	6,05	6,33	5,75	6,04	6,33
5,10	5,20	7,00	7,35	7,70	6,99	7,34	7,68
5,75	5,88	7,81	8,20	8,59	7,79	8,18	8,57
5,95	5,96	7,90	8,29	8,69	7,88	8,28	8,67
7,23	7,53	9,70	10,19	10,67	9,68	10,17	10,65
8,67	9,00	11,37	11,94	12,50	11,34	11,91	12,47
8,80	9,15	11,54	12,11	12,69	11,51	12,08	12,66
10,05	10,52	13,05	13,70	14,35	13,01	13,66	14,31
11,35	11,93	14,59	15,31	16,04	14,53	15,26	15,99
14,60	15,01	17,88	18,77	19,66	17,79	18,68	19,57
15,15	15,60	18,50	19,43	20,35	18,41	19,33	20,25
16,60	16,48	19,43	20,40	21,37	19,32	20,29	21,25
18,25	18,49	21,51	22,59	23,67	21,38	22,45	23,52
18,35	18,61	21,64	22,72	23,80	21,51	22,58	23,66
19,57	20,13	23,20	24,36	25,52	23,05	24,20	25,35
24,20	23,10	26,25	27,56	28,87	26,02	27,32	28,62
24,86	23,94	27,10	28,45	29,81	26,86	28,20	29,54
29,75	28,12	31,29	32,85	34,41	30,95	32,49	34,04
28,40	28,55	31,68	33,26	34,84	31,37	32,93	34,50
35,35	34,32	37,36	39,23	41,09	36,89	38,73	40,58
41,80	39,69	42,57	44,70	46,83	41,93	44,03	46,12

Q_E: Caudal experimental (L/s); Q_C: Caudal de calibración (L/s); Q_A: Caudal según Autenheimer (L/s); Q_J: Caudal según SABO (L/s)

gar hasta un 12% y para la fórmula del Grupo SABO alrededor del 5%; todo esto comprueba que a pesar de que ambas fórmulas tienden a sobreestimar los gastos máximos pasantes, la fórmula del Grupo de Ingeniería SABO lo hace en menor grado.

4. Conclusiones

La precisión que se obtiene utilizando las fórmulas del Grupo SABO y de Autenheimer son relativamente similares, pudiéndose establecer que el uso de la fórmula del Grupo de Ingeniería SABO, ecuación 7, es apropiada para el dimensionamiento de secciones de flujo en los diques usados para el control de

Cuadro 3. Valores de los diferentes caudales obtenidos para el modelo 1V:1/2H aterrado.

Q _E	Q _C	Q _A			Q _J		
		μ = 0,60	μ = 0,63	μ = 0,66	C = 0,60	C = 0,63	C = 0,66
2,41	2,29	3,10	3,25	3,41	2,92	3,07	3,21
2,50	2,38	3,20	3,36	3,52	3,02	3,17	3,32
3,75	3,80	4,91	5,16	5,40	4,64	4,88	5,11
6,20	6,34	7,89	8,28	8,68	7,44	7,81	8,18
6,90	7,03	8,69	9,12	9,56	8,18	8,59	9,00
8,02	8,22	10,03	10,53	11,04	9,44	9,91	10,39
8,50	8,55	10,43	10,96	11,48	9,80	10,29	10,77
10,85	11,30	13,46	14,13	14,80	12,65	13,28	13,91
11,85	12,06	14,34	15,05	15,77	13,43	14,10	14,78
13,78	13,92	16,39	17,21	18,03	15,32	16,09	16,85
13,95	14,43	16,90	17,75	18,59	15,84	16,63	17,43
15,71	16,05	18,69	19,62	20,56	17,47	18,34	19,22
16,95	17,48	20,20	21,22	22,23	18,89	19,84	20,78
18,18	18,31	21,15	22,21	23,27	19,71	20,70	21,68
19,65	20,20	23,12	24,27	25,43	21,58	22,66	23,73
20,25	20,12	23,13	24,29	25,44	21,50	22,57	23,65
20,35	20,24	23,26	24,42	25,58	21,62	22,70	23,78
23,00	21,91	25,19	26,45	27,71	23,26	24,42	25,58
23,45	23,98	27,13	28,49	29,85	25,27	26,53	27,79
25,40	25,17	28,50	29,92	31,35	26,41	27,74	29,06
28,00	27,48	30,96	32,51	34,06	28,63	30,07	31,50
28,62	28,10	31,61	33,19	34,78	29,23	30,69	32,15
29,90	29,04	32,65	34,28	35,92	30,13	31,64	33,15
32,40	31,90	35,56	37,34	39,12	32,85	34,49	36,13
37,85	36,14	40,12	42,12	44,13	36,83	38,68	40,52

Q_E: Caudal experimental (L/s); Q_C: Caudal de calibración (L/s); Q_A: Caudal según Autenheimer (L/s); Q_J: Caudal según SABO (L/s)

Cuadro 4. Valores de los diferentes caudales obtenidos para el modelo 1V:1/2H sin aterrar.

Q _E	Q _C	Q _A			Q _J		
		μ = 0,60	μ = 0,63	μ = 0,66	C = 0,60	C = 0,63	C = 0,66
2,35	2,15	2,79	2,93	3,06	2,78	2,92	3,06
4,05	3,95	4,86	5,10	5,35	4,85	5,10	5,34
6,20	6,36	7,51	7,88	8,26	7,49	7,87	8,24
6,20	6,46	7,61	8,00	8,38	7,60	7,98	8,36
7,90	7,99	9,26	9,72	10,18	9,24	9,70	10,16
9,30	9,47	10,82	11,36	11,90	10,79	11,33	11,87
9,60	10,07	11,44	12,01	12,59	11,41	11,98	12,55
11,90	12,23	13,68	14,37	15,05	13,63	14,31	14,99
13,80	14,48	15,98	16,78	17,58	15,91	16,71	17,50
14,25	14,69	16,19	17,00	17,81	16,12	16,93	17,73
16,27	16,48	18,00	18,90	19,80	17,90	18,80	19,69
17,00	17,22	18,74	19,67	20,61	18,64	19,57	20,50
17,60	18,38	19,90	20,89	21,89	19,79	20,78	21,77
22,30	19,97	21,52	22,59	23,67	21,35	22,41	23,48
20,25	20,13	21,64	22,73	23,81	21,50	22,57	23,65
22,10	22,10	23,59	24,77	25,95	23,42	24,59	25,76
22,65	23,05	24,51	25,74	26,97	24,34	25,55	26,77
24,60	24,57	26,01	27,31	28,61	25,80	27,09	28,38
28,45	28,25	29,59	31,07	32,55	29,32	30,78	32,25
29,20	29,11	30,42	31,94	33,46	30,13	31,64	33,15
31,08	30,82	32,07	33,67	35,28	31,74	33,33	34,92
32,55	31,67	32,89	34,54	36,18	32,54	34,16	35,79
35,35	34,49	35,60	37,38	39,16	35,19	36,94	38,70
35,85	35,72	36,75	38,59	40,43	36,33	38,14	39,96
40,10	38,78	39,69	41,67	43,66	39,17	41,12	43,08

Q_E: Caudal experimental (L/s); Q_C: Caudal de calibración (L/s); Q_A: Caudal según Autenheimer (L/s); Q_J: Caudal según SABO (L/s)

Cuadro 5. Errores promedios para los diferentes gastos calculados con respecto al gasto experimental.

Modelo	E _C	E _A			E _J		
		μ = 0,60	μ = 0,63	μ = 0,66	C = 0,60	C = 0,63	C = 0,66
1V:1H aterrado	6,35	23,87	30,07	36,26	15,28	20,02	25,73
1V:1H sin aterrar	2,97	25,08	31,33	37,59	24,52	30,75	36,97
1V:1/2H aterrado	2,36	18,31	24,23	30,14	10,71	16,02	21,54
1V:1/2H sin aterrar	2,67	10,45	15,59	21,09	10,00	14,90	20,37

E_C: Error de calibración (%); E_A: Error para los gastos obtenidos con Autenheimer (%); E_J: Error para los gastos obtenidos con SABO (%)

Cuadro 6. Errores para los gastos máximos con respecto al gasto experimental.

Modelo	E _C	E _A			E _J		
		μ = 0,60	μ = 0,63	μ = 0,66	C = 0,60	C = 0,63	C = 0,66
1V:1H aterrado	-6,95	6,49	11,82	17,14	-4,49	0,29	5,06
1V:1H sin aterrar	-5,06	1,84	6,93	12,02	0,31	5,33	10,34
1V:1/2H aterrado	-4,53	5,99	11,28	16,58	-2,68	2,18	7,05
1V:1/2H sin aterrar	-3,28	-1,03	3,92	8,87	-2,33	2,56	7,44

E_C: Error de calibración para los gastos máximos (%); E_A: Error para los gastos máximos obtenidos con Autenheimer (%); E_J: Error para los gastos máximos obtenidos con SABO (%)

torrentes. Además, es una ecuación de estructura simple, donde el gasto depende del coeficiente de descarga (C), la altura del vertedero (H) y de la base inferior (B_1) y superior de la sección de flujo (B_2), lo cual facilita el cálculo, los resultados muestran que los gastos calculados por esta fórmula, aún cuando no significativamente, sobreestiman en menor grado que Autenheimer, con respecto al gasto real.

5. Referencias bibliográficas

- AGUILAR, C. 1990. Metodología para la sistematización de diseño de diques para el control de torrentes y su aplicación a un caso específico. Trabajo de grado. Maestría en Planificación de Recursos Hidráulicos. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Mérida, Venezuela. 212 p.
- AGUIRRE, J., E. JAUREGUI y L. FERNÁNDEZ. 1971. *Guía de trabajos prácticos*. Laboratorio de Hidráulica. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 72 p.
- FRANZINI, J. y E., FINNENORE. 1999. *Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*. Novena edición. Mc Graw Hill. Madrid, España. 503 p.
- HATTINGER, H. 1971. *Guía de control de torrentes*. Publicación de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. 55 p.
- GILES, R., J. EVETT y L. CHENG. 2001. *Mecánica de fluidos e hidráulica*. Tercera edición. Mc Graw Hill. España. 420 p.
- JICA. 1989. *SABO Work Engineering*. Japan International Cooperation Agency (JICA). SABO Work Shop in 1989. 187 p.