

# Modelo experimental para el estudio de la disipación de energía mediante el uso de gaviones en canales homogéneos en el control de inundaciones

Luis Efrén Ayala Rojas\*

Fecha de envío: 2 de diciembre de 2009

Fecha de aceptación: 1º de marzo de 2010

## RESUMEN

El proyecto de investigación corresponde al estudio de la disipación de energía mediante el uso de estructuras de gavión, en un modelo construido en escala 1:10 simulando una corriente con transporte de flujo de 5 m<sup>3</sup>/seg, con ancho de solera de 5 m, profundidad máxima de 4,5 m y 4000 m de longitud. Teniendo en cuenta que la estructura en gavión es una técnica sencilla para hacer estructuras hidráulicas de bajo costo y larga duración en países en desarrollo, la flexibilidad intrínseca del armazón de los gaviones, sujetos a tensión y compresión alternantes, les permite trabajar sin romperse, y así se evita que pierdan su eficacia estructural. La investigación está enfocada a describir los flujos sobre gaviones en comparación con los escalonados de construcción común para canales homogéneos, evaluación cualitativa y cuantitativa de la disipación de energía para el sistema propuesto de gaviones en comparación con escalones en concreto, deformación en los gaviones y factores que afectan su resistencia y duración, estudios para la prevención de inundaciones con el uso de disipadores de energía construidos con muros en gavión.

**Palabras clave:** disipación, energía, modelos físicos, gavión, inundaciones.

## EXPERIMENTAL MODEL FOR STUDYING ENERGY DISSIPATION BY GABIONS IN HOMOGENEOUS CHANNELS FOR FLOOD CONTROL

### ABSTRACT

The study of the energy dissipation using gabion structures, was made in a model built in scale 1:10 simulating a current with transport of flow of 5 m<sup>3</sup>/seg, with wide of reserve of 5 m, maximum depth of 4.5 m and 4000 meters of length. Keeping in mind that the gabion structures in are a simple technique to make hydraulic structures of low cost and it releases duration in countries in development, the intrinsic flexibility of the frame of the gabions is subject to tension and alternating compression, allows them to work without breaking, and it is avoided this way them to lose its structural effectiveness. The investigation is focused to describe the flows it has more than enough gabions in comparison with those staggered of common construction, for homogeneous channels, qualitative and quantitative evaluation of the energy dissipation for the proposed system of gabions in comparison with steps in short, deformation in the gabions and factors that affect the resistance and duration of the same ones, studies for the prevention of floods with the use of built energy dissipated with walls in gabion.

**Keywords:** dissipation, energy, models, gabion, floods.

\* Ingeniero Civil, Universidad de La Salle. Profesor de Ingeniería Civil, Universidad de La Salle. Correo electrónico: layalar@lasalle.edu.co

## INTRODUCCIÓN

El agua recogida por los canales interceptores es entregada a canales de alta velocidad generalmente en la dirección del talud; esto sucede por la topografía colombiana, la cual reviste gran importancia en el diseño de canales en ríos de montaña con el fin de proteger de posibles inundaciones las zonas de erosión aledañas a las márgenes de la corriente y las zonas urbanas. Las alturas verdaderas del flujo son mayores que las calculadas por la ecuación de Manning, debido a la presencia del aire atrapado, razón por la cual se hace necesario estudiar la disipación de energía a lo largo de los canales. Es recomendable colocar elementos que produzcan gran rugosidad para generar flujo amortiguado y minimizar la velocidad en su pie.

Este proyecto pretende comparar los saltos ocasionados por una gradería construida usando estructuras en gavión, teniendo en cuenta que es una técnica sencilla para hacer estructuras hidráulicas de bajo costo y teniendo en cuenta la flexibilidad propia del armazón de los gaviones, sujetos a tensión y compresión alternantes les permiten trabajar sin romperse y así se evita que pierdan su eficiencia estructural; es de vital importancia para efectos de la investigación comparar la disipación de energía describiendo los flujos sobre los escalones en concreto y los gaviones y determinar los parámetros del diseño.

## DISEÑO DEL MODELO

### CONDICIONES DE SIMILITUD

Las condiciones hidráulicas para la presente investigación, por ser el estudio del modelo de superficie libre y de origen turbulento, deberá ser el criterio básico correspondiente al número de Froude:

$$Fr = \frac{v_r}{\sqrt{gD_r}} = 1 \quad (1)$$

Donde:

F = número de Froude.

v = velocidad de flujo.

D = profundidad hidráulica del flujo.

g = aceleración de la gravedad.

r = relación o escala entre la magnitud del prototipo y la del modelo. Esta relación, en función de las escalas del modelo, se expresa por:

$$v_r = \frac{v_p}{v_n} = L_r^{1/2} = \frac{L_p}{L_n}^{1/2} \quad (2)$$

donde el subíndice p indica el valor de la magnitud dada en el prototipo y el subíndice n indica el valor de esta magnitud en el modelo.

La relación (2) indica la escala a la cual quedan reproducidas las velocidades del flujo, dada una escala geométrica de longitudes. Igualmente, define la escala de caudales como:

$$Q_r = v_r \times A_r = (L_r)^{3/2} \times L_r^2 = L_r^{7/2} \quad (3)$$

Tanto la relación (2) como la (3) se aplican exclusivamente a modelos no-distorsionados, en los cuales la escala geométrica vertical es igual a la horizontal. Analizando la ecuación de Chezy:

$$V = C \times \sqrt{RS}$$

$$\text{Donde: } Fr = CrLr^{1/2} \quad (4)$$

$$\text{y como, } Fr = Lr^{1/2}$$

Se deduce que:  $C_r = 1,0 \quad (5)$

Donde C es el coeficiente de Chezy; R es el radio hidráulico del flujo y S la pendiente de la línea de energía.

Para analizar el coeficiente de fricción en la ecuación de Chezy se debe usar la ecuación de Manning para estimar C:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (6)$$

a. Similitud geométrica:

$$\frac{E_d}{E_x} = \frac{E_y}{E_x} = \frac{E_z}{E_x} \quad (7)$$

b. Similitud cinemática:

$$\frac{E_v}{E_g} = \frac{E_g E_t}{E_x} \quad (8)$$

c. Similitud dinámica:

- Condición de Froude

$$\frac{E_v}{E_g} = (E_x E_t)^{1/2} \quad (9)$$

- Condición de fricción

$$E_c = \left( \frac{E_x}{E_x E_d} \right)^{1/2} \quad (10)$$

El flujo en este tipo de problemas es turbulento, porque el modelo utilizado también lo es. En obras de ingeniería el flujo turbulento ha sido ampliamente estudiado, para lo cual existen varios criterios:

a. Ven Te Chow:

$$Re^* = \frac{vR}{\nu} > 500 \quad (11)$$

b. F. M. Henderson:

$$Re^* = \frac{v^2 K_s}{\nu} > 100 \quad (12)$$

c. M. S. Yalin:

$$Re = \frac{v^2 K_s}{\nu} > 70 \text{ aproximadamente} \quad (13)$$

Siendo:

v = velocidad media de flujo.

R = radio hidráulico.

$K_s$  = tamaño de la rugosidad, equivalente al diámetro de arena uniformemente distribuida. En la tabla 4, se muestran algunos valores.

$\nu^*$  = velocidad al corte.

$\nu$  = viscosidad cinemática.

$\tau$  = esfuerzo cortante.

$\rho$  = densidad del fluido.

$\Sigma$  = pendiente hidráulica.

**Tabla 1. Valores de  $K_s$ , en mm, para superficies de concreto y albañilería**

Superficie	$K_s$ (mm)
Concreto con cimbra metálica	0,15
Aplanado de cemento liso, con bordes y juntas enrasadas	0,3
Concreto lanzado sobre cimbra metálica lubricada con cuidadoso	0,4
Concreto aplanado semiliso	0,6

Fuente: Vergara (2003)

En cuanto a la condición de fricción, se establece mediante la escala de coeficientes de fricción, la  $E_c$  (1.12) se emplea el coeficiente de Chezy que puede expresarse en función del coeficiente adimensional de fricción  $f$ .

Para la condición de flujo con fronteras hidráulicamente lisas, donde el valor de la rugosidad  $\epsilon \ll \delta$ , siendo  $\delta$  = espesor de la capa límite, la fricción o resistencia de flujo depende básicamente de la fuerza de arrastre de superficie, donde  $Re < 25000$  es de mayor importancia que  $\frac{\epsilon}{R}$  y según trabajos de Nikuradse, Colebrook y White.

$$f = \frac{0,223}{Re^{1/4}} \quad (14)$$

$$C = \frac{18,76}{Re^{1/4}} \quad (15)$$

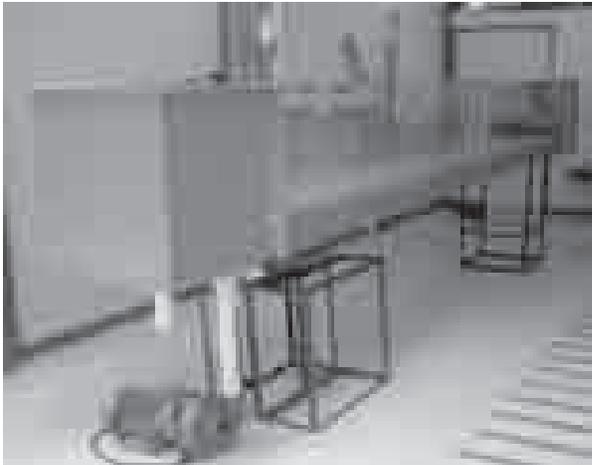
Para flujo con fronteras hidráulicamente rugosas, donde  $\epsilon > \delta$ , la resistencia al flujo depende de la fuerza de arrastre, de forma en la que el factor  $\frac{\epsilon}{R}$  es de mayor importancia que  $Re$ . Resultado:

$$\frac{1}{f} = \frac{c}{\sqrt{8g}} = 2 \log \left( \frac{12R}{K_s} \right) \quad (16)$$

## MONTAJE EXPERIMENTAL

### CONSTRUCCIÓN MODELO A ESCALA

Se realizó un modelo a escala 1:10, con un ancho de fondo de 50 cm, altura de 50 cm y longitud de 4 m, construido en dos secciones de 2 m de longitud cada una, en acrílico y perfiles metálicos unidos por medio de pernos, provisto de una bomba de 5 HP, para manejar un caudal aproximado de  $0,004 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 1. Modelo a escala**

En los extremos del modelo de canal se colocaron tanques que reciben y evacuan el flujo.



**Figura 2. Tanques laterales del modelo**

El modelo tiene dos bases metálicas, provisto de un tornillo sinfín que permite variar la pendiente de

fondo. De igual forma el modelo está provisto de un tanque de 1000 l, para hacer recircular dicho caudal.



**Figura 3. Bases metálicas del canal**



**Figura 4. Tanque de almacenamiento**

Las dimensiones de los gaviones construidos para el modelo son de  $10 \times 20 \times 50 \text{ cm}$ , con una malla hexagonal de alambre de  $0,7 \text{ mm}$ , relleno con piedra  $8-10 \text{ mm}$ , que pasa el tamiz  $3/8''$  y retiene en el tamiz n.º 4. Se elaboraron pequeños cajones con la malla para facilitar la construcción del gavión.



**Figura 5. Gaviones del modelo**

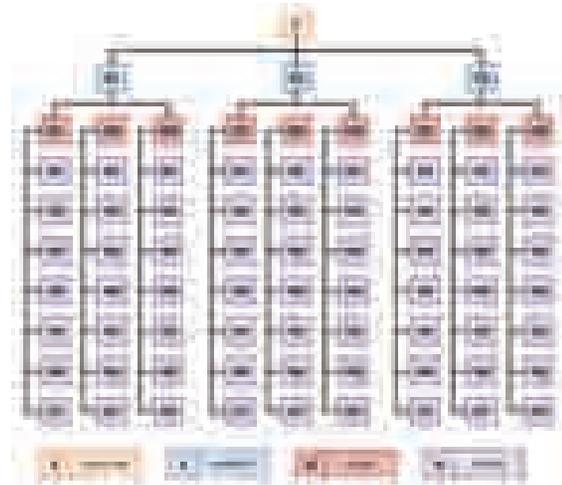
Las dimensiones de la escalera construida para el modelo son de 50 x 50 x 40 cm, en concreto, para un total de seis escalones.



**Figura 6. Escalera del modelo**

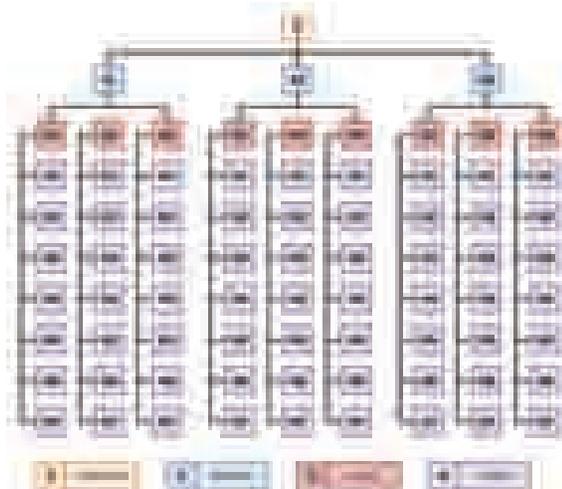
### TOMA DE DATOS

*Escaleras.* Para tomar los datos de esta estructura se realizó el siguiente procedimiento:



**Figura 7. Procedimiento de toma de datos para la escalera**

*Gaviones.* Para tomar los datos de esta estructura se realizó el siguiente procedimiento:



**Figura 8. Procedimiento de toma de datos para los gaviones**

Para todas las estructuras el aforo se hizo por medio del método volumétrico y las alturas se tomaron con un limnómetro.

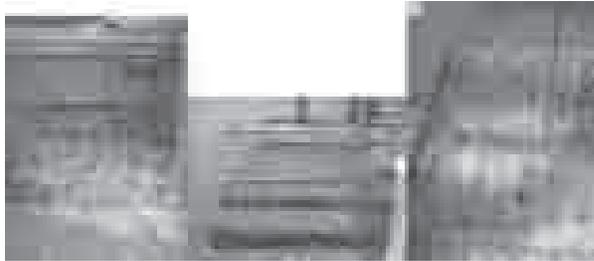


Figura 9. Toma de alturas en cada estructura por medio del limnómetro



Figura 10. Aforo de caudal

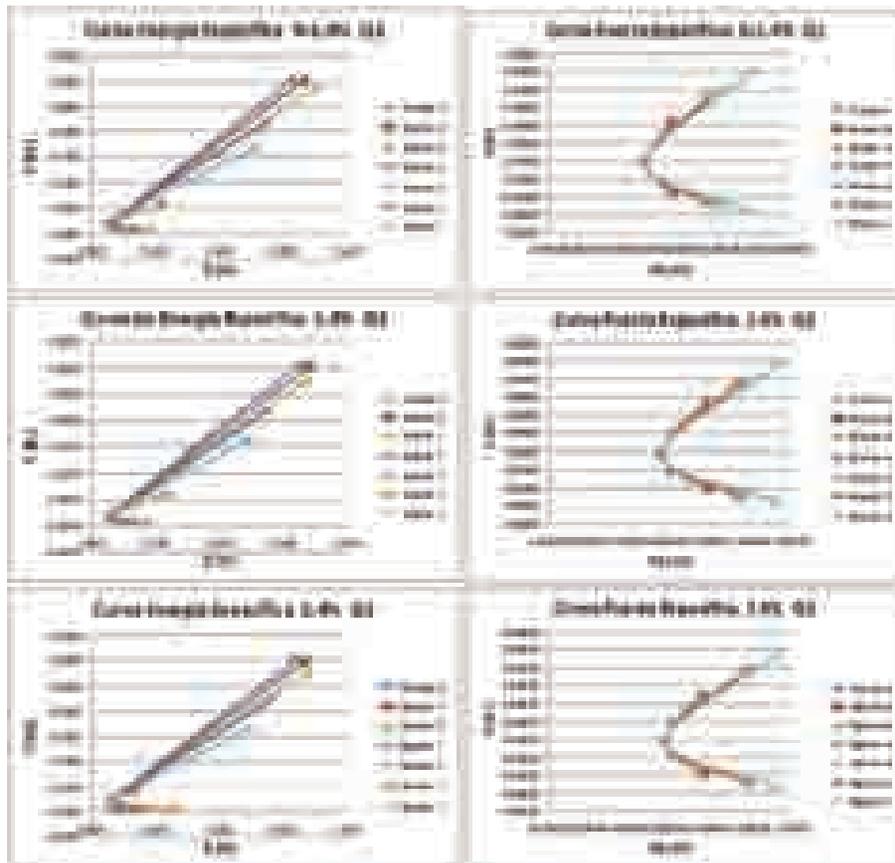
## RESULTADOS EXPERIMENTALES ESCALERAS EN CONCRETO

Tabla 2. Resultados energía y fuerza específica escaleras en concreto

Estructura		Pendiente	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Energía Específica (m)			Fuerza Específica (m)			Pérdida de E	
Tipo		(%)	(Q)	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	F <sub>100</sub>	F <sub>200</sub>	F <sub>300</sub>	ΔE (m)	
ESCALERAS EN CONCRETO	Largada metro	0.0%	0.00417	0.308	0.029	0.334	5.368E-04	5.530E-04	5.348E-04	0.0023	
	Escalon 5			0.344	0.029	0.347	7.748E-04	5.530E-04	7.686E-04	0.0100	
	Escalon 4			0.345	0.029	0.349	8.538E-04	5.530E-04	8.532E-04	0.0273	
	Escalon 3			0.279	0.029	0.364	8.218E-04	5.530E-04	8.218E-04	0.0230	
	Escalon 2			0.260	0.029	0.364	1.138E-03	5.530E-04	1.148E-03	0.0467	
	Escalon 1			0.111	0.029	0.361	8.028E-04	5.530E-04	8.088E-04	0.0056	
	sumatoria			0.007	0.029	0.037	8.708E-04	5.530E-04	8.688E-04	0.0008	
	sumatoria										8.1348
	Largada metro			0.0%	0.00440	0.303	0.030	0.334	8.888E-04	5.948E-04	8.708E-04
	Escalon 5	0.304	0.030			0.347	7.588E-04	5.948E-04	7.518E-04	0.0058	
	Escalon 4	0.304	0.030			0.374	1.028E-03	5.948E-04	1.028E-03	0.0300	
	Escalon 3	0.284	0.030			0.370	1.028E-03	5.948E-04	1.028E-03	0.0289	
	Escalon 2	0.251	0.030			0.365	1.208E-03	5.948E-04	1.208E-03	0.0491	
	Escalon 1	0.086	0.030			0.357	8.178E-04	5.948E-04	8.028E-04	0.0165	
	sumatoria	0.042	0.030			0.040	7.788E-04	5.948E-04	7.708E-04	0.0047	
	sumatoria										8.1328
	Largada metro	0.0%	0.00286			0.315	0.021	0.323	3.248E-04	3.048E-04	3.288E-04
	Escalon 5			0.329	0.021	0.337	4.418E-04	3.048E-04	4.378E-04	0.0091	
	Escalon 4			0.302	0.021	0.359	5.778E-04	3.048E-04	5.788E-04	0.0274	
	Escalon 3			0.289	0.021	0.354	5.578E-04	3.048E-04	5.578E-04	0.0257	
	Escalon 2			0.232	0.021	0.376	8.538E-04	3.048E-04	8.778E-04	0.0430	
	Escalon 1			0.146	0.021	0.362	5.348E-04	3.048E-04	5.348E-04	0.0204	
	sumatoria			0.006	0.021	0.021	3.978E-04	3.048E-04	3.948E-04	0.0049	
	sumatoria										8.1248

**Tabla 3. Resultados energía y fuerza específica escaleras en concreto (pendiente 1,4%)**

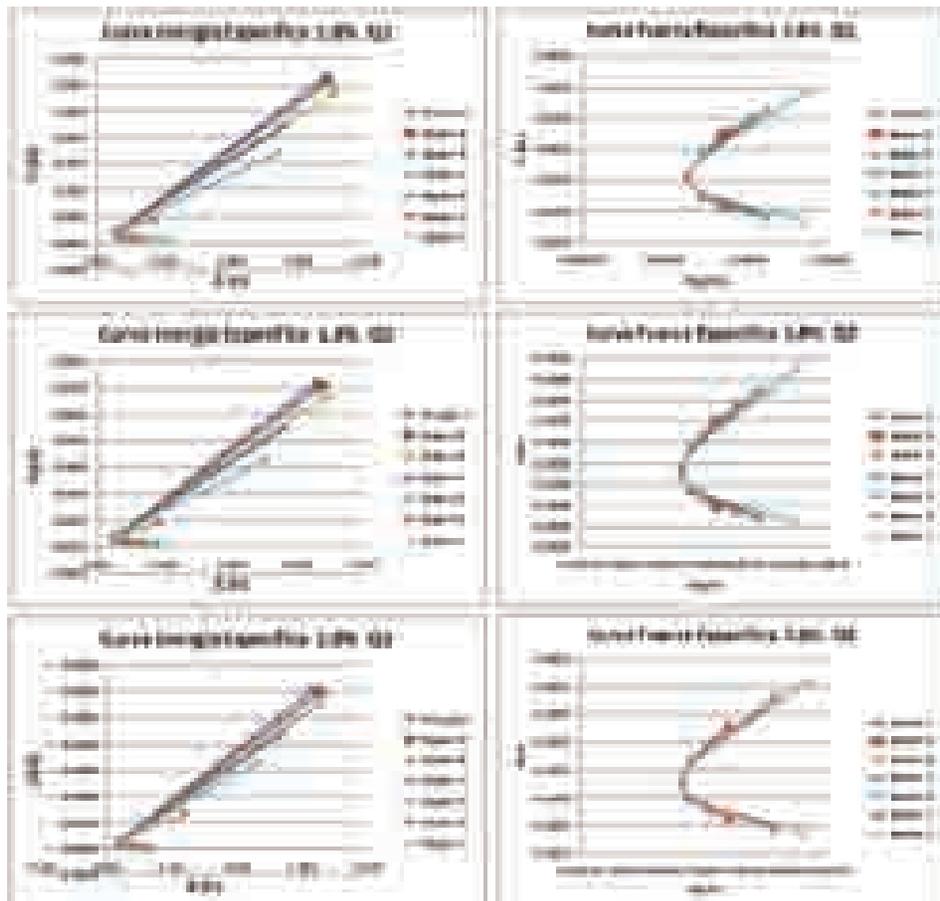
Estructura		Pendiente (%)	Caudal (m³/s)	Energía Específica (m)			Fuerza Específica (m)			Pérdida de C (m)
Tipo			(Q)	$E_p$	$E_d$	$E_s$	$F_{ps}$	$F_{pd}$	$F_{psd}$	$\Delta E$ (m)
ESCALERAS EN CONCRETO	Largada estri	1,4%	0,00470	0,313	0,029	0,029	1,620-04	1,620-04	1,620-04	1,620-04
	Sección 6			0,331	0,029	0,041	1,140-04	1,620-04	1,110-04	0,008
	Sección 5			0,349	0,029	0,037	0,890-04	1,620-04	0,890-04	0,000
	Sección 4			0,277	0,029	0,094	0,320-04	1,620-04	0,270-04	0,0017
	Sección 3			0,269	0,029	0,094	1,110-03	1,620-04	1,170-03	0,0007
	Sección 2			0,171	0,029	0,082	0,110-04	1,620-04	0,100-04	0,0013
	Sección 1			0,033	0,029	0,029	0,110-04	1,620-04	0,100-04	0,0079
	sumatoria									
	Largada estri	1,4%	0,00410	0,324	0,029	0,032	0,020-04	0,070-04	0,090-04	0,0010
	Sección 6			0,339	0,029	0,049	1,890-04	0,070-04	1,790-04	0,0020
	Sección 5			0,320	0,029	0,059	0,070-04	0,070-04	0,000	0,0000
	Sección 4			0,277	0,029	0,099	0,440-04	0,070-04	0,410-04	0,0006
	Sección 3			0,249	0,029	0,090	1,110-03	0,070-04	1,120-03	0,0008
	Sección 2			0,119	0,029	0,082	0,210-04	0,070-04	0,170-04	0,0013
	Sección 1			0,037	0,029	0,037	0,740-04	0,070-04	0,720-04	0,0008
	sumatoria									<b>0,1009</b>
	Largada estri	1,4%	0,00420	0,320	0,029	0,031	0,020-04	0,740-04	0,720-04	0,0008
	Sección 6			0,333	0,029	0,044	1,690-04	0,740-04	1,610-04	0,0019
	Sección 5			0,339	0,029	0,059	0,770-04	0,740-04	0,740-04	0,0000
	Sección 4			0,282	0,029	0,059	0,870-04	0,740-04	0,790-04	0,0000
	Sección 3			0,247	0,029	0,059	1,120-03	0,740-04	1,140-03	0,0008
	Sección 2			0,120	0,029	0,059	0,020-04	0,740-04	0,800-04	0,0014
	Sección 1			0,033	0,029	0,030	0,110-04	0,740-04	0,720-04	0,0008
	sumatoria									<b>0,1000</b>



**Figura 11. Curvas de energía y fuerza específica (pendiente 0%)**

**Tabla 4. Resultados energía y fuerza específica escaleras en concreto (pendiente 1,8%)**

Estructura	Pendiente (%)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Energía Específica (m)			Fuerza Específica (m)			Pérdida de E (m)		
			E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>			
ESCALERAS EN CONCRETO	1,8%	0,00466	Legada agua	0,337	0,031	0,037	7,338	-0,485	-0,4	7,356	0,002
			Escalon 3	0,342	0,031	0,047	8,028	-0,485	-0,4	8,079	0,003
			Escalon 2	0,362	0,031	0,033	1,178	-0,485	-0,4	1,178	0,000
			Escalon 4	0,370	0,031	0,050	1,048	-0,485	-0,4	1,048	0,000
			Escalon 1	0,359	0,031	0,104	1,348	-0,485	-0,4	1,371	0,008
			Escalon 2	0,384	0,031	0,052	3,178	-0,485	-0,4	3,028	0,0114
	Escalon 1	0,347	0,031	0,043	3,178	-0,485	-0,4	3,126	0,007		
	Sumatoria								8,7325		
	Legada agua	0,330	0,037	0,030	3,328	-0,485	-0,4	3,328	0,0011		
	Escalon 3	0,330	0,037	0,041	3,328	-0,485	-0,4	3,408	0,0078		
	Escalon 2	0,345	0,037	0,050	3,573	-0,485	-0,4	3,573	0,000		
	Escalon 4	0,381	0,037	0,050	3,528	-0,485	-0,4	3,528	0,0004		
	Escalon 3	0,381	0,037	0,050	3,528	-0,485	-0,4	3,528	0,000		
	Escalon 2	0,381	0,037	0,050	7,528	-0,485	-0,4	7,528	0,000		
	Escalon 1	0,382	0,037	0,034	3,728	-0,485	-0,4	3,728	0,000		
Sumatoria								8,7325			
Legada agua	0,315	0,019	0,021	2,828	-0,485	-0,4	2,828	0,000			
Escalon 3	0,327	0,019	0,034	3,528	-0,485	-0,4	3,528	0,000			
Escalon 2	0,328	0,019	0,034	4,528	-0,485	-0,4	4,528	0,000			
Escalon 4	0,373	0,019	0,034	4,528	-0,485	-0,4	4,528	0,000			
Escalon 3	0,333	0,019	0,037	3,178	-0,485	-0,4	3,433	0,0483			
Escalon 2	0,318	0,019	0,030	4,528	-0,485	-0,4	4,528	0,000			
Escalon 1	0,329	0,019	0,028	3,528	-0,485	-0,4	3,528	0,000			
Sumatoria								8,7325			

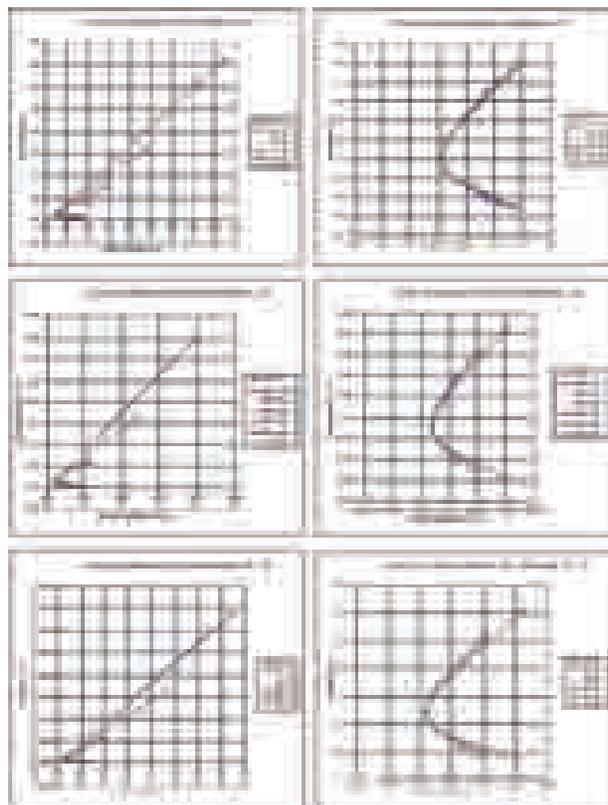


**Figura 12. Curvas de energía y fuerza específica (pendiente 1,4%)**

## GAVIONES

**Tabla 5. Resultados energía y fuerza específica escaleras en concreto (pendiente 0%)**

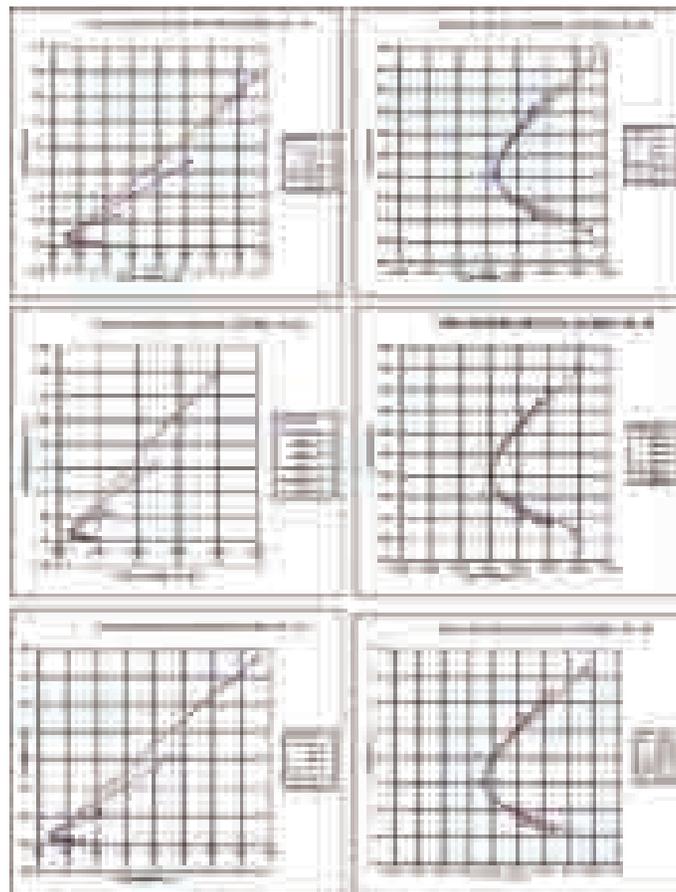
Estructura	Pendiente (%)	Cavidad (C)	Energía Específica (m)			Fuerza Específica (m)			Pérdida de E (m)	
			E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	F <sub>1c</sub>	F <sub>2c</sub>	F <sub>3c</sub>		
ESCALERAS EN GAVIONES	0.0%	0.00451	Arroyito en T	0.422	0.030	0.398	1.038 (-0.02)	1.148 (-0.4)	1.038 (-0.02)	0.0445
			En cañon 3	0.357	0.030	0.328	0.448 (-0.02)	0.748 (-0.4)	0.328 (-0.02)	0.0759
			En cañon 2	0.304	0.030	0.274	0.398 (-0.02)	0.748 (-0.4)	0.298 (-0.02)	0.0519
			En cañon 4	0.327	0.030	0.294	1.398 (-0.02)	1.448 (-0.4)	1.398 (-0.02)	0.0485
			En cañon 3	0.340	0.030	0.314	1.398 (-0.02)	1.448 (-0.4)	1.398 (-0.02)	0.0382
			En cañon 2	0.350	0.030	0.324	1.198 (-0.02)	1.448 (-0.4)	1.198 (-0.02)	0.0335
			En cañon 1	0.321	0.030	0.292	0.498 (-0.02)	1.448 (-0.4)	0.598 (-0.4)	0.0305
			Normalmente							0.1682
			Arroyito en T	0.385	0.027	0.354	7.078 (-0.4)	4.798 (-0.4)	7.078 (-0.4)	0.0771
			En cañon 3	0.324	0.027	0.294	0.498 (-0.4)	4.798 (-0.4)	0.398 (-0.4)	0.0378
			En cañon 2	0.281	0.027	0.250	7.078 (-0.4)	4.798 (-0.4)	7.078 (-0.4)	0.0381
			En cañon 4	0.311	0.027	0.284	0.008 (-0.4)	4.798 (-0.4)	0.078 (-0.4)	0.0447
	En cañon 3	0.249	0.027	0.222	0.008 (-0.4)	4.798 (-0.4)	1.078 (-0.4)	0.0410		
	En cañon 2	0.113	0.027	0.087	0.798 (-0.4)	4.798 (-0.4)	0.078 (-0.4)	0.0328		
	En cañon 1	0.050	0.027	0.023	0.078 (-0.4)	4.798 (-0.4)	1.078 (-0.4)	0.0325		
	Normalmente							0.1489		
	0.0%	0.00209	Arroyito en T	0.274	0.018	0.254	2.028 (-0.4)	2.208 (-0.4)	2.028 (-0.4)	0.0788
			En cañon 3	0.325	0.018	0.307	2.208 (-0.4)	2.208 (-0.4)	2.208 (-0.4)	0.0368
			En cañon 2	0.319	0.018	0.294	2.028 (-0.4)	2.208 (-0.4)	2.028 (-0.4)	0.0477
			En cañon 4	0.287	0.018	0.269	4.008 (-0.4)	2.208 (-0.4)	4.008 (-0.4)	0.0328
			En cañon 3	0.234	0.018	0.214	2.028 (-0.4)	2.208 (-0.4)	2.208 (-0.4)	0.0485
			En cañon 2	0.097	0.018	0.078	4.008 (-0.4)	2.208 (-0.4)	4.078 (-0.4)	0.0212
			En cañon 1	0.020	0.018	0.002	2.008 (-0.4)	2.208 (-0.4)	2.008 (-0.4)	0.0218
			Normalmente							0.1488



**Figura 13. Curvas de energía y fuerza específica (pendiente 0%)**

**Tabla 6. Resultados energía y fuerza específica escaleras en concreto (pendiente 1,4%)**

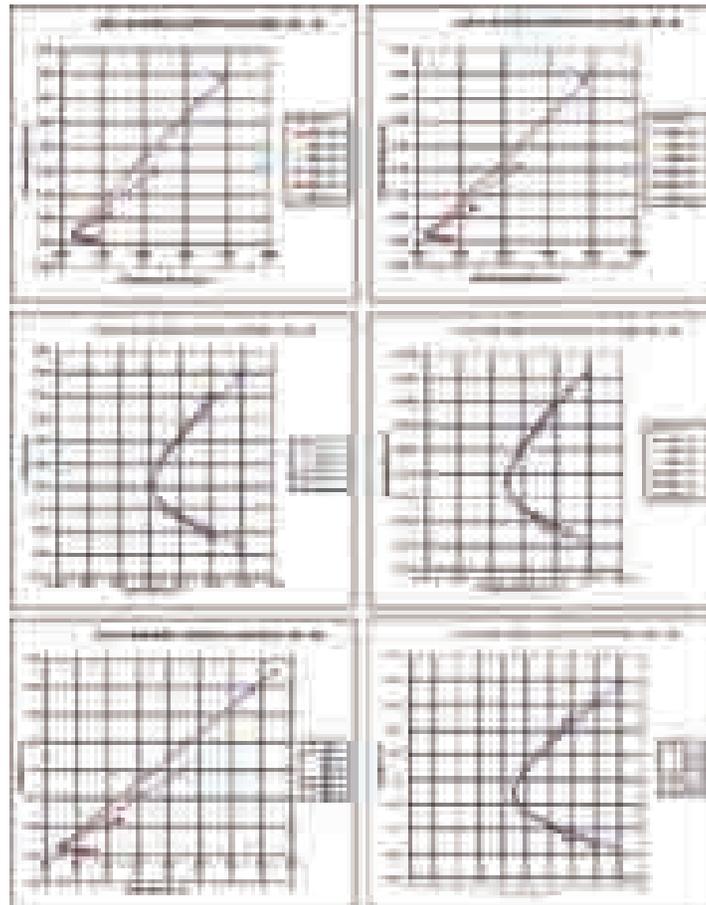
Estructura		Pendiente (S)	Caudal (m <sup>3</sup> /s) (Q)	Energía Específica (m)			Fuerza Específica (m)			Perdida de E (ΔE (m))
Tipo				E <sub>0</sub>	E <sub>C</sub>	E <sub>1</sub>	F <sub>E1</sub>	F <sub>EC</sub>	F <sub>E2</sub>	
ESCALERAS EN GAVIONES	Llegada estructura	1.4%	0.00474	0.380	0.031	0.051	9.16E-04	6.56E-04	9.07E-04	0.0108
	Escalón 6			0.364	0.031	0.059	1.00E-03	6.56E-04	9.91E-04	0.0169
	Escalón 5			0.309	0.031	0.045	8.46E-04	6.56E-04	8.40E-04	0.0067
	Escalón 4			0.337	0.031	0.086	1.23E-03	6.56E-04	1.24E-03	0.0391
	Escalón 3			0.259	0.031	0.095	1.29E-03	6.56E-04	1.31E-03	0.0474
	Escalón 2			0.124	0.031	0.069	1.09E-03	6.56E-04	1.08E-03	0.0246
	Escalón 1			0.034	0.031	0.038	7.57E-04	6.56E-04	7.58E-04	0.0026
	<b>sumatoria</b>								<b>0.1480</b>	
	Llegada estructura	1.4%	0.00445	0.386	0.030	0.058	9.29E-04	6.03E-04	9.21E-04	0.0170
	Escalón 6			0.335	0.030	0.047	8.20E-04	6.03E-04	8.12E-04	0.0089
	Escalón 5			0.316	0.030	0.049	8.43E-04	6.03E-04	8.35E-04	0.0104
	Escalón 4			0.331	0.030	0.087	1.16E-03	6.03E-04	1.17E-03	0.0411
	Escalón 3			0.243	0.030	0.090	1.18E-03	6.03E-04	1.20E-03	0.0440
	Escalón 2			0.119	0.030	0.066	1.00E-03	6.03E-04	9.98E-04	0.0236
	Escalón 1			0.031	0.030	0.036	6.89E-04	6.03E-04	6.91E-04	0.0022
	<b>sumatoria</b>								<b>0.1472</b>	
	Llegada estructura	1.4%	0.00302	0.374	0.023	0.049	5.83E-04	3.61E-04	5.80E-04	0.0163
	Escalón 6			0.329	0.023	0.041	5.24E-04	3.61E-04	5.19E-04	0.0099
	Escalón 5			0.308	0.023	0.043	5.40E-04	3.61E-04	5.34E-04	0.0114
	Escalón 4			0.317	0.023	0.076	7.38E-04	3.61E-04	7.52E-04	0.0397
	Escalón 3			0.230	0.023	0.079	7.54E-04	3.61E-04	7.72E-04	0.0428
Escalón 2	0.108			0.023	0.057	6.33E-04	3.61E-04	6.33E-04	0.0227	
Escalón 1	0.024			0.023	0.028	4.12E-04	3.61E-04	4.13E-04	0.0017	
<b>sumatoria</b>								<b>0.1446</b>		



**Figura 15. Curvas de energía y fuerza específica (pendiente 1,4%)**

**Tabla 7. Resultados energía y fuerza específica escaleras en concreto (pendiente 1,8%)**

Estructura		Pendiente (%)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Energía Específica (m)			Fuerza Específica (m)			Pendiente de T <sub>0</sub> (m)
Tipo				E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	
ESCALERAS EN GAVIONES	Límite inferior	1,8%	0,00404	0,289	0,000	0,000	0,040	0,208	0,000	0,000
	Escalon 5			0,330	0,000	0,040	0,140	0,208	0,000	0,000
	Escalon 4			0,358	0,000	0,040	0,040	0,208	0,000	0,000
	Escalon 3			0,340	0,000	0,000	1,200	0,208	0,000	1,200
	Escalon 2			0,277	0,000	0,000	1,170	0,208	0,000	1,180
	Escalon 1			0,119	0,000	0,000	1,000	0,208	0,000	1,000
	superior			0,020	0,000	0,000	1,000	0,208	0,000	1,000
	Límite inferior	1,8%	0,00303	0,341	0,000	0,000	1,140	0,400	0,000	1,140
	Escalon 5			0,338	0,000	0,040	1,170	0,400	0,000	1,240
	Escalon 4			0,320	0,000	0,000	0,200	0,400	0,000	0,200
	Escalon 3			0,281	0,000	0,000	0,700	0,400	0,000	0,280
	Escalon 2			0,230	0,000	0,000	0,040	0,400	0,000	0,200
	Escalon 1			0,120	0,000	0,000	0,700	0,400	0,000	0,200
	superior			0,000	0,000	0,000	0,700	0,400	0,000	0,000
	Límite inferior	1,8%	0,00304	0,370	0,000	0,000	0,000	4,400	0,000	0,000
	Escalon 5			0,334	0,000	0,040	0,700	4,400	0,000	0,000
	Escalon 4			0,317	0,000	0,000	1,000	4,400	0,000	1,000
	Escalon 3			0,270	0,000	0,000	1,000	4,400	0,000	1,000
	Escalon 2			0,230	0,000	0,000	0,000	4,400	0,000	0,000
	Escalon 1			0,119	0,000	0,000	1,000	4,400	0,000	1,000
	superior			0,000	0,000	0,000	4,700	4,400	0,000	4,000



**Figura 16. Curvas de energía y fuerza específica (pendiente 1,8%)**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas sobre el modelo de canal permiten evaluar la disipación de energía y la potencia disipada debida al resalto hidráulico, comparando estructuras en gavión, estructuras en concreto y una rampa, todas de las mismas dimensiones o construidas de forma similar. Las principales conclusiones del estudio son:

Las estructuras escalonadas son estructuras óptimas para la disminución de velocidades en canales de pendiente; las velocidades obtenidas en los escalones de concreto son del orden del 25% al 30% menores que las obtenidas en los escalones en gavión, lo que quiere decir que son las estructuras más adecuadas para el control de inundaciones.

En los escalones se genera un resalto hidráulico, lo que quiere decir que en el escalón hay un cambio de una profundidad baja a una más alta (es decir de flujo supercrítico a uno subcrítico); la profundidad antes del resalto se conoce como profundidad inicial  $Y_1$  y  $Y_2$  se conoce como profundidad secuente, de tal forma que para el análisis de los resultados se usaron las ecuaciones establecidas para el resalto. Los escalones se comportan como vertederos que fueron estudiados por Bakhmeteff, donde se invierte la curvatura y se convierte en un flujo supercrítico, razón por la cual se forma un resalto hidráulico.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que la disipación de energía y la potencia disipada debida al resalto producido son inversamente proporcionales a la pendiente longitudinal del canal. Una vez determinados los valores tanto de pérdidas de energía como de potencia disipada para cada una de las estructuras analizadas, se concluye que las pérdidas de energía son mayores para los gaviones (respecto a las escaleras de uso convencional del orden del 10% al 20%), además la potencia disipada

en los gaviones es mayor que en los escalones en un orden del 15% al 30%, dado que la potencia disipada está en función de la pérdida de energía.

Es importante tener en cuenta que aunque desde el punto de vista hidráulico la estructura en gavión es más eficiente en la disipación de energía que en las escaleras de concreto, la vida útil del gavión es menor por diferentes factores como la corrosión de la malla, la deformación generada por el desgaste del material pétreo y en general por su conformación estructural. Todo lo anterior es motivo de investigación.

Los resultados obtenidos demuestran que el número de Froude no tiene cambios significativos para los dos tipos de estructuras analizadas, ya que la velocidad para los dos casos es muy parecida.

Los resultados obtenidos se analizaron en una hoja electrónica con las ecuaciones del resalto hidráulico, para la comprobación de los datos se planteó un programa en MATLAB que arroja resultados similares a los estudiados y las gráficas correspondientes a energía y fuerza específica.

Se realizaron gráficas de energía y fuerza específica para cada uno de los ensayos, de las cuales se puede analizar lo siguiente: la variación de la energía para cada una de las estructuras estudiadas, cambia del primer escalón con respecto al último, llegando a la profundidad crítica y del comportamiento de la fuerza específica, que se aprecian en las profundidades subsecuentes. Una profundidad se relaciona con la siguiente, la cual pasa por la profundidad crítica. En la curva de fuerza específica se hace evidente que en cada paso del escalón sólo hay presencia de la fuerza específica.

Aunque estas las variables no formaron parte de esta investigación, es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones para que una estructura en gavión disipe energía y se comporte bien estructuralmente:

Para el caso de la estructura en gavión se recomienda cimentar con losa (colchones) o empotramiento de mampostería para darle resistencia al empuje de la corriente, ya que ésta genera una socavación y como consecuencia tendríamos el volcamiento de la estructura.

Es conveniente pañetar la cara posterior del cuerpo de la estructura en gavión, debido a que la infiltración del agua es muy alta y no disiparía la cantidad de energía esperada.

En cuanto al proceso constructivo de los gaviones, es importante tener en cuenta: el tamaño de la roca ubicada en las caras deberá ser mayor al de el ojo de

la malla; el material rocoso del centro puede ser más pequeño pero no menor de 8 cm; según los requerimientos la malla hexagonal debe tener las siguientes dimensiones: 5 x 7 cm, 8 x 10 cm y 12 x 14 cm (es-cuadrías típicas de mallas hexagonales).

Las estructuras en gaviones son altamente permeables, y por ende se comportan como drenes facilitando la eliminación de los efectos de la presión hidrostática.

Las estructuras en gaviones retienen los materiales sólidos aguas arriba y admiten la filtración del agua reduciendo así la velocidad del flujo, lo cual aumenta el tiempo de escurrimiento.

## REFERENCIAS

- Agostini R. et ál. (1981) *Flexible structures in river and stream training Works*. Bologna: McCaferri.
- Aguirre, J. (1974) *Hidráulica de canales*. Venezuela: CIDIAT.
- Angulo C. 1981. "La erosión y su control en la meseta de Bucaramanga". IV Conferencia regional de Geotecnia. Barranquilla.
- Baquero, Barbosa, Pabón. (1981) *Comportamiento de gaviones*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Chaudrhry. *Open Channel Flow*. Prentice Hall.
- Chow, V. T. (1994) *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá: McGraw Hill.
- French, R. *Hidráulica de canales abiertos*. MacGraw-Hill.
- Henderson, F. M. (1966) *Open Channel Flow*. Nueva Jersey: Prentice Hall.
- Nekrassov, B. (1967) *Tours D'Hydraulique*. Editorial MIR.
- U.S. (1965) *Bureau Of Reclamation. Design Of Small Dams*. Washington: US Government Printing Office.
- Vergara, M. A. (1993) *Técnicas de modelación en hidráulica*. México: Alfaomega.