

Estudio experimental de un disipador de energía para avalanchas con flujos de detritos

Experimental study of an energy dissipater for debris flow avalanches

Nelson Javier Cely-Calixto ¹

¹ Grupo de Investigación en Hidrología y Recursos Hídricos – HYDROS, Facultad de Ingeniería, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia. Orcid: [0000-0002-2083-6978](https://orcid.org/0000-0002-2083-6978). Correo electrónico: nelsonjaviercc@ufps.edu.co

Recibido: 30 septiembre, 2024. Aceptado: 9 enero, 2025. Versión final: 2 febrero, 2025.

Resumen

La investigación tiene por objetivo evaluar un dispositivo rígido disipador de energía bajo condiciones de flujos de detritos e hiperconcentrados. El desarrollo experimental se efectúa empleando un modelo a escala mediante condiciones de similitud geométrica, cinemática y dinámica en un canal de 2.3 m longitud, 0.7 m base y 0.07 m de altura, variando la pendiente entre 2% y 8%, evaluadas sin dispositivo y con dispositivo disipador, en este se evalúa la separación de barras de rejillas de 14 mm y 8 mm, disponiendo dos estructuras separadas a 0.4 m una de la otra a lo largo del área de estudio, con un caudal de entrada de 0.015 m³/s y un diámetro medio de partículas de 5.1 mm. El desarrollo experimental demuestra una reducción entre el 50% y el 70% del volumen de flujo de escombros en condiciones extremas de pendiente del canal (8%); así mismo, se observa hasta un 93% de disminución de la afectación para pendientes del 2% y hasta un 88% para pendientes del 8% luego de la disposición del disipador rígido de energía. Se observa que en zonas tropicales el flujo de avalancha que presenta mayor incidencia es el de detritos, por lo cual, es determinante para seleccionar la alternativa y dimensiones del tipo de disipador de energía; así mismo, se observa un impacto positivo representativo en la disminución de la afectación luego de la disposición del disipador, lo que denota que esto es una alternativa viable para disipar la energía de flujos de avalancha por detritos e hiperconcentrados en zonas tropicales, aladañas a áreas montañosas con pendientes superiores al 2.5%.

Palabras clave: detritos; dispositivo; flujos de avalancha; hiperconcentrados; similitud; zonas tropicales.

Abstract

The research aims to evaluate a rigid energy-dissipating device under debris and hyper-concentrated flow conditions. The experimental development is carried out using a scale model using geometric, kinematic, and dynamic similarity conditions, using a channel of 2.3 m length, 0.7 m base, and 0.07 m height, varying the slope between 2% and 8%, evaluated without device and with dissipating device, in this the separation of 14mm and 8mm grating bars is evaluated, arranging two structures separated at 0.4 m from each other along the study area, with an inlet flow of 0.015 m³/s and an average particle diameter of 5.1 mm. The experimental development shows a reduction of between 50% and 70% of the volume of debris flow in extreme conditions of channel slope (8%); likewise, a reduction of up to 93% is observed for slopes of 2% and up to 88% for slopes of 8% after the arrangement of the rigid energy dissipater. It is observed that in tropical zones the avalanche flow that presents the highest incidence is that of debris, which is a determining factor in selecting the alternative and dimensions of the type of energy dissipater; likewise, a representative positive impact is observed in the reduction of the impact after the arrangement of the dissipater, which indicates that

this is a viable alternative to dissipate the energy of debris and hyper-concentrated avalanche flows in tropical zones, close to mountainous areas with slopes greater than 2.5%.

Keywords: debris; device; avalanche flows; hyper-concentrated; similarity; tropical zones.

1. Introducción

Los movimientos en masas son considerados desplazamientos descendentes que resultan del proceso por el cual una cantidad de material de la corteza terrestre con cierto grado de inclinación y compuesto por rocas, tierra, detritos o escombros, sufre un deslizamiento pendiente abajo por la acción de la gravedad y otros factores externos, entre estos movimientos encontramos las avalanchas, siendo uno de los acontecimientos naturales clasificados entre los fenómenos más destructivos y se producen debido a la inestabilidad del terreno [1].

Así mismo, entre las avalanchas encontramos una clasificación de distintos flujos y movimientos, dentro de estos están los flujos de detritos, los cuales se generan debido a que los suelos variables y secos de la alta montaña se vuelven vulnerables frente a la sobrehidratación, provocando deslizamientos superficiales o caídas de rocas desde la cabecera de la cuenca, siendo esta la zona con mayor inestabilidad en taludes o laderas, dado que posee la mayor pendiente [2], [3]. Además, las corrientes que componen estos flujos de avalancha son de tipo líquido-sólido y a medida que recorren su trayectoria van aumentando su velocidad, fuerza, energía y densidad [4], [5], [6].

Por esta razón, con el paso del tiempo se han registrado gran cantidad de estos sucesos de alta magnitud ocasionando muchas pérdidas humanas y económicas [7]. A partir de allí, ha surgido la necesidad de implementar métodos de contención y disminución de la fuerza del flujo para disipar la energía que estos conllevan, los cuales se clasifican en sistemas flexibles y rígidos [8]; estos últimos son construidos con materiales que no permiten deformaciones ni alteraciones en su estructura, por lo general se conforman de concreto y acero, dependiendo de las características particulares de cada sistema, los cuales varían sus materiales adicionales, por ejemplo, entre estos se encuentra el dispositivo disipador de energía, su funcionamiento se basa en permitir el paso de cierta cantidad de agua y sedimentos finos para disminuir la velocidad del flujo y así detener el transporte del material de mayor tamaño, y con esto, reducir la afectación aguas abajo de la estructura [9].

Este sistema cuenta con limitada información en fuentes bibliográficas, pero a diferencia de los demás

dispositivos dispone de un diseño estructural horizontal, lo que permite que el flujo se encuentre de manera paralela a dicho diseño facilitando el curso normal del flujo; por esta razón, se tomó la decisión de someterlo a prueba en diferentes pendientes, y de esta forma, observar su comportamiento y la capacidad de disminución del impacto que tiene frente a estos fenómenos [9].

La investigación tiene por objetivo analizar el comportamiento hidráulico de un dispositivo disipador de energía rígido y su eficacia en la reducción del área de afectación, para esto se determinan las condiciones de similitud de características geométricas del modelo físico que se ajusten al prototipo, bajo condiciones de avalancha en ríos de montaña, tomando en consideración específicamente flujos de detritos hiperconcentrados; así mismo, se toma en consideración factores de semejanza cinemática y dinámica, abarcando así la totalidad del comportamiento hidráulico del cauce.

2. Materiales y métodos

2.1. Escala de similitud

Los flujos de avalancha son fenómenos naturales ocasionados por la erosión y desestabilización de material acumulado en el manto o corteza terrestre, cuando el flujo de agua recorre el cauce, provoca la separación y posteriormente el transporte del material; con base a lo anterior, la selección de escala se realizó cumpliendo con los requisitos señalados por Vergara [10], para modelos de fondo fijo y móvil considerando el menor efecto de escala. En este sentido, en el desarrollo de la escala se toma la menor escala posible para el análisis de la erosión local por corrientes, por lo cual se considera la similitud geométrica de un modelo sin distorsión [10]. Por tal motivo, el factor de escala se determina mediante la relación adimensional de la longitud del prototipo en función a la longitud del modelo físico, empleando la ecuación 1 [11].

$$\lambda l = \frac{1}{50} \quad (1)$$

Donde:

λl : factor de escala del modelo

2.2. Velocidad y profundidad de flujo

El cálculo de la velocidad y la profundidad de flujo se realiza mediante la determinación de valores, en este caso, se emplea un cronómetro con el que se contabiliza el tiempo que tarda en recorrer el flujo la zona inclinada, la que tiene una distancia de 1.10 m; a partir de estos datos, y empleando la ecuación 2, se obtiene la velocidad de flujo [12].

$$V = U_* * C_* \quad (2)$$

Donde:

V: velocidad de flujo (m/s)

U*: velocidad de corte (m/s)

C*: coeficiente de Chezy

Por otra parte, teniendo los valores obtenidos mediante las ecuaciones anteriores, se realiza un cálculo inverso, con el fin de determinar el valor del tirante hidráulico del flujo, aplicando la ecuación 3 [13]. En este sentido, se realiza el despeje de la ecuación de Chezy, con el fin de disponer una expresión matemática en función del tirante del flujo, igualando la ecuación 3 a la velocidad del flujo obtenido mediante la ecuación 2; de esta forma, se comparan los valores de velocidad obtenidos mediante las dos ecuaciones.

$$V = \left(\left(9.8 * \frac{(B * Y)}{B + 2Y} * S_0 \right)^{1/2} * 100 \right) * \left(2.5 \ln \left(\frac{Y}{\frac{D_m}{10}} \right) + 6 \right) \quad (3)$$

Donde:

V: velocidad media de flujo (m/s)

B: base (m)

Y: profundidad del flujo (m)

S₀: pendiente de fondo (m/m)

D_m: diámetro medio (m)

En vista de la ausencia de un equipo especializado para medir la velocidad y profundidad del flujo, se realizan pruebas de ensayo para determinar los valores de dichos parámetros, de esta forma, se empleó un cronómetro con el que se contabilizó el tiempo que tardaba el flujo en recorrer la zona inclinada dispuesta para asemejar a la zona de avalancha; con base al tiempo y distancia y tomando referencia de las ecuaciones 2 y 3, se obtuvo la velocidad y profundidad del flujo para cada una de las condiciones de pendiente analizadas.

2.3. Tamaño de la partícula y disposición del lecho

La disposición del diámetro medio de las partículas se realiza teniendo en cuenta lo dispuesto por Suárez [14], en este se propone que los cauces constituidos por flujos no viscosos y características hidráulicas de carácter recto, poseen un material de lecho compuesto por rocas con un diámetro de hasta 300 mm, por lo tanto, en estos cauces predominan los materiales de partículas gruesas [14]. Por lo tanto, se seleccionó un diámetro medio de material de cauce de 255 mm para el prototipo, por lo cual, representa un diámetro medio de 5.1 mm para el modelo físico. De la misma forma, teniendo en cuenta los porcentajes de material dispuesto luego de realizado el tamizaje en el laboratorio, se obtiene la curva granulométrica como se observa en la Figura 1.

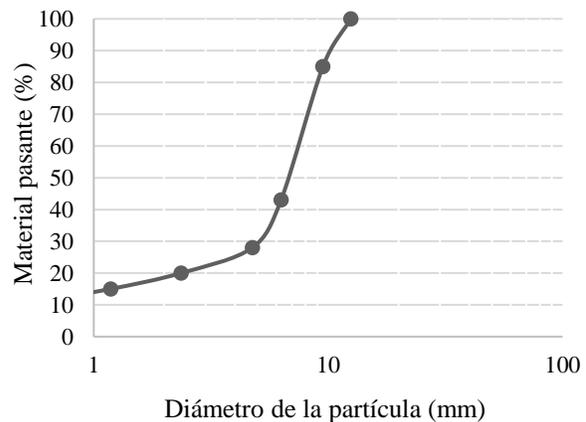


Figura 1. Curva granulométrica

El modelo de laboratorio representa un flujo no newtoniano, por lo cual, este debe cumplir una concentración de sólidos del 60% del volumen en el canal, por lo tanto, se debe incrementar la concentración de estos, con la finalidad de que el flujo hiperconcentrado se convierta en un flujo de detritos [4]. Con base a lo anterior, para el diseño de la mezcla de flujo de detritos, se establece un caudal de entrada de 0.015 m³/s. Así mismo, el 39% en volumen del canal corresponde a agua clara y el 61% a sedimentos. Del porcentaje de sedimentos, el 85% corresponde a material grueso y el 15% a partículas finas, teniendo en cuenta esto, las características del modelo constan de una masa por experimento de 9.55 Kg de lecho granular, con un volumen de 0.015 m³ de agua, y una densidad de 636.67 kg/m³ [4].

En la disposición de la mezcla de detritos se tiene en cuenta la condición de similitud de transporte de sedimento, por esta razón, las variables determinantes son la disponibilidad de material y la capacidad de

arrastre del flujo [15]; además de esto, el proceso tiene en cuenta tres fases: erosión, transporte y deposición de sedimento antes y después de la disposición del mecanismo disipador de energía [16]. El arrastre de sedimento puede efectuarse en un cauce de dos formas, por suspensión o por tracción; el primero iguala la velocidad de las partículas a las del flujo, mientras que, en el segundo la velocidad del sedimento es menor [15], [17], [18], [19]. El análisis de la velocidad de arrastre del material de fondo por unidad de ancho y tiempo en un torrente uniforme, sin tener en cuenta la limitación de disponibilidad de sedimento, se determina de forma semi empírica mediante las ecuaciones 4 – 6 [20].

$$qs = \left(8Fr_d \left(1 - \frac{0.047}{Fr_d} \right)^{3/2} \right) \rho_s DU \quad (4)$$

$$Fr_d = \frac{YS_0}{\gamma' D} \quad (5)$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad (6)$$

Donde:

qs: arrastre de material por unidad de ancho-tiempo
 Frd: número de Froude densimétrico o parámetro de Shields
 ps: densidad del sedimento
 D: diámetro medio de las partículas (m)
 U: velocidad de corte (m/s)
 Y: tirante de agua (m)
 S0: pendiente hidráulica
 γ' : peso específico relativo aparente del sedimento
 γ_s : peso específico del sedimento
 γ : peso específico del agua

2.4. Disposición del modelo experimental

El modelo experimental se dispone teniendo en consideración la simulación de flujo de ríos, para lo cual se emplea un modelo de dimensiones de largo, base y profundidad de 2.3 m, 0.7 m y 0.07 m respectivamente. Se evalúan siete escenarios de pendiente longitudinal del cauce de 2% a 8%, esto con el fin de representar condiciones de ríos de montaña, los cuales poseen pendientes superiores al 2%, y con base a las características geométricas elegidas en la investigación [14]. Cada una de las pendientes analizadas se evalúan en las dos condiciones, sin el dispositivo y con el dispositivo; además de esto, se realiza tres veces la modelación de cada pendiente para los dos escenarios, con el fin de reducir el rango de incertidumbre en los resultados obtenidos, y verificar la similitud de la tendencia de los datos.

El diseño del modelo toma en consideración lo dispuesto en la literatura sobre sistemas disipadores de energía, aplicando algunas modificaciones pertinentes con respecto a las restricciones del modelo de laboratorio y con el cual se efectúe la evaluación adecuada en los experimentos. De esta forma, se dispone del dispositivo con separación de barras de rejillas de 14 mm y 8 mm, disponiendo dos estructuras separadas a 0.4 m una de la otra a lo largo del área de estudio, de esta forma, aguas abajo se aumenta la influencia en la disipación de energía y posteriormente, la reducción del porcentaje del área de afectación [18].

2.5. Determinación del área de afectación

El análisis de las dos alternativas de separación entre rejillas del dispositivo rígido disipador de energía, en cada una de las pendientes dispuestas, tiene en cuenta la comparación con el área de afectación antes de dispuesto el disipador; de esta forma, analizando las áreas afectadas antes y después, se determina el porcentaje de reducción de cada alternativa para cada una de las pendientes analizadas. Para esto, se toman en consideración las ecuaciones 7 – 10.

$$A = PI + \frac{PB}{2} - 1 \quad (7)$$

$$\% \text{afectación} = \frac{A * 100}{17.40 \text{ m}^2} \quad (8)$$

$$\% \text{afectación sedimentos} = \frac{A_s * 100}{A_m} \quad (9)$$

$$\% \text{disminución afectación} = 100 - \frac{\% \text{afectación sedimentos} * 100}{\% \text{afectación}} \quad (10)$$

Donde:

A: área de influencia (m²)
 PI: puntos internos de medición
 PB: puntos de borde
 As: área afectada solo por sedimentos (m²)
 Am: área afectada por la mezcla (m²)

Los modelos se diseñaron como un sistema articulado de dos secciones, con el fin de reducir la dificultad en la graduación de la pendiente, por lo cual, la parte alta se dispuso sobre tablas de madera y se verificó el valor de la altura con el uso de un clinómetro casero y uno digital; en este sentido, la primera parte del modelo experimental abarcó una longitud de 1.10 m, siendo esta la que varía la pendiente, tomando esta sección como la zona montañosa del cauce. La segunda sección ubicada aguas abajo de la ubicación del dispositivo abarcó la longitud restante (1.20 m), siendo esta la zona de lecho inmóvil, la cual

asemeja la parte urbana en la que se mide la afectación antes y después de la disposición del dissipador de energía. En la **Figura 2** se presenta el esquema tridimensional de la zona experimental.

3. Resultados y discusión

3.1. Velocidad y profundidad del flujo

De acuerdo a lo presentado en la **Tabla 1** y **Tabla 2** se observa que, de conformidad a los resultados de

velocidad crítica de corte, se obtiene la velocidad y profundidad de flujo para los modelos experimental y prototipo, denotando así un aumento en estos parámetros y siendo semejantes al factor de escala obtenido anteriormente, lo cual da cumplimiento a las leyes hidráulicas de similitud que se tienen en cuenta en la investigación (geométrica, cinemática y dinámica), lo que permite representar el fenómeno de flujos de avalancha en dimensiones o escalas mayores.



Figura 2. Esquema 3D del modelo experimental con el dissipador de energía.

Tabla 1. Velocidad y profundidad de flujo del modelo de laboratorio (modelo físico)

Pendiente (%)	Velocidad de corte	Coefficiente de Chezy	Velocidad de Flujo	Profundidad de flujo
Símbolo	U^{*}	C^{*}	V'	Y'
Unidad	m/s	-	m/s	m
2	0.05	9.15	0.42	0.018
3	0.06	8.86	0.49	0.016
4	0.07	9.27	0.62	0.018
5	0.08	9.66	0.76	0.022
6	0.09	9.77	0.85	0.023
7	0.10	9.64	0.89	0.021
8	0.11	9.93	1.02	0.024

Tabla 2. Velocidad y profundidad de flujo del modelo escalado (prototipo)

Pendiente (%)	Velocidad de corte	Coefficiente de Chezy	Velocidad de Flujo	Profundidad de flujo
Símbolo	U^*	C^*	V	Y
Unidad	m/s	-	m/s	m
2	0.33	9.15	3.03	0.90
3	0.39	8.86	3.47	0.80
4	0.47	9.27	4.41	0.94
5	0.55	9.66	5.38	1.10
6	0.61	9.77	6.05	1.15
7	0.65	9.64	6.34	1.09
8	0.72	9.93	7.21	1.22

Como se presenta en la **Tabla 1**, la profundidad del flujo alcanza casi la totalidad de la profundidad del lecho dispuesto en el modelo experimental, por lo cual, el flujo de avalancha representa una problemática de gran influencia sobre zonas aledañas a montaña, causando así fallas estructurales, lo cual se traduce en afectación social, política, económica y ambiental, tal como lo dispuesto en [21] y [22], en los que se determina los niveles cualitativos y cuantitativos de las afectaciones generadas por los flujos de avalancha en zonas urbanas y rurales, aledañas a sectores montañosos y que están en altos índices de riesgo o amenaza alta. De la misma forma y de conformidad con los resultados presentados en la **Tabla 2**, se observan los factores de escala reflejados en la proyección del modelo escalado o prototipo, representando esto, un riesgo similar al observado en el modelo experimental; de esta forma se determina que, a mayores dimensiones del escenario del cauce, los flujos de detritos representan grandes riesgos por avalancha [22].

Con base a esto, se observa que los cauces aluviales presentan condiciones de lecho granular, los cuales tienen mayor resistencia en cuanto a fluidez del sedimento, tal como se ha presentado en investigaciones como las realizadas por Khan y Valentino [23], los cuales analizan el comportamiento del flujo en condiciones de lechos granulares y la capacidad de arrastre y deposición de sedimento por acción del flujo.

Por otra parte, mediante las ecuaciones 4 – 6, se obtienen los resultados para el acarreo de sedimentos del lecho, este se analiza mediante el número de Froude densimétrico de la partícula, siendo este un parámetro regulador del transporte de sólidos [13]. En la **Tabla 3** se presenta la similitud de transporte de sedimentos para las pendientes analizadas.

Tabla 3. Similitud de transporte de sedimentos por Froude densimétrico

Pendiente (%)	Froude Densimétrico modelo	Froude Densimétrico prototipo
Símbolo	Fr_d'	Fr_d''
2	0.04	0.04
3	0.06	0.06
4	0.09	0.09
5	0.13	0.13
6	0.16	0.16
7	0.18	0.18
8	0.23	0.23

Según los resultados presentados anteriormente, se observa la similitud de los parámetros generales entre el modelo de laboratorio y el prototipo para el transporte de sedimentos tomando en consideración el factor de escala seleccionado, lo que significa que es un modelo de fondo móvil representado a mayor escala, de acuerdo con el régimen turbulento y la condición de Froude densimétrico. De esta forma, se da cumplimiento a la condición por leyes de similitud (geométrica, cinemática y dinámica) para el modelo experimental y el prototipo, esto de conformidad con lo planteado por Vergara [10] para la modelación hidráulica adecuada, teniendo en cuenta las características y condiciones del flujo y sedimento.

3.2. Área de afectación

El modelo experimental en el que se analiza la influencia del flujo de avalancha sobre el área de afectación urbana; así mismo, se observa la influencia del dispositivo disipador de energía sobre la reducción de dicha afectación inicial, denotando así, la eficacia de la estructura en cada una de las pendientes analizadas en la investigación.

Por su parte, mediante la disposición del modelo experimental, así como de la observación de los datos de laboratorio y las ecuaciones 7 y 8, se obtiene el porcentaje de afectación en función al área designada del modelo experimental, específicamente, de la zona urbana. En la **Tabla 4** se presentan los resultados obtenidos del porcentaje de afectación de la zona urbana sin la disposición del disipador de energía para cada pendiente analizada.

Tabla 4. Porcentaje de afectación sin disipador de energía

Pendiente (%)	Pi	Pb	Área (m ²)	Afectación (%)
2	8.54	0.67	7.88	45.28
3	9.53	0.65	8.85	50.88
4	10.49	0.42	9.70	55.73
5	11.48	0.33	10.65	61.19
6	13.75	0.34	12.92	74.22
7	14.11	0.20	13.21	75.95
8	14.45	0.13	13.51	77.66

Tal como se observa en la **Tabla 4**, para cada una de las pendientes analizadas en la investigación, sin la disposición del dispositivo disipador de energía el porcentaje de afectación del área urbana en general está por encima del 50% en la mayoría de las pendientes, esto representa una problemática para sectores aledaños a

zonas de montaña, los cuales son altamente influenciadas por los flujos de avalancha [24]. De acuerdo a lo presentado anteriormente, es de gran importancia el análisis de alternativas de reducción del riesgo por amenaza alta de flujo de avalancha de detritos o hiperconcentrados en zonas de montaña, los cuales generan una problemática sobre zonas urbanas aledañas y que se traducen en pérdidas económicas, sociales, ambientales y, en gran variedad de ocasiones, pérdida de vidas humanas [22].

En vista de lo anterior y de conformidad a los resultados presentados en la **Tabla 4**, así como de los datos obtenidos luego de la disposición del dispositivo rígido dissipador de energía y las ecuaciones 9 – 10, se determina el porcentaje de disminución de la afectación del flujo de avalancha de detritos e hiperconcentrados en zonas de montaña, para cada una de las pendientes analizadas. En la **Tabla 5** se presentan los porcentajes de afectación con la disposición del dissipador de energía.

De acuerdo con lo presentado en la **Tabla 5**, se observa la distribución de la afectación en cuanto al área afectada del modelo experimental (zona urbana), así mismo, se denota la distribución porcentual de la afectación sobre la mezcla con relación al área total del modelo experimental, la cual aumenta desde un 4.05% hasta un 83.43% para las pendientes 2% y 8%, respectivamente. Por otra parte, luego de la disposición del dissipador rígido

de energía, se observan afectaciones de sedimentos totales que fluctúan entre 1.17% y 76.84%, siendo esta última la obtenida para el modelo evaluado en condición de pendiente mínima (2%).

De esta forma, se determina que, la afectación por sedimentos varía desde un 76.84% hasta un 10.89% para las pendientes de 2% y 8% respectivamente denotando así que, en condición de pendiente máxima, se produce una afectación menor sobre la zona urbana del modelo luego de la implementación de la estructura rígida dissipadora de energía, esto de conformidad con lo presentado por Ahmed & Ghumman [25], quienes evaluaron la disipación máxima de alternativas de estructura dissipadora híbrida, sistemas únicos y compuestos solo por vegetación, obteniendo así una variación en la reducción entre el 32% y el 46% de la zona afectada para sistemas únicos e híbridos respectivamente.

Finalmente, teniendo en cuenta los porcentajes de afectación antes y después de la disposición del dissipador rígido de energía, así como del porcentaje de afectación en área total de sedimentos, se emplea la ecuación 10 y se determina el porcentaje de disminución de la afectación sobre el área total del modelo experimental. En la **Tabla 6** se presentan los resultados de disminución de la afectación luego de la disposición del dissipador de energía.

Tabla 5. Porcentaje de afectación total con el dissipador rígido de energía

Pendiente (%)	Pit	Pbt	Área afectada por mezcla (m ²)	Pis	Pbs	Área afectada por sedimentos (m ²)	% afectación en área total		% Afectación de sedimentos
							Mezcla	Sedimentos	
2	1.38	0.64	0.70	0.31	0.29	0.54	4.05	3.11	76.84
3	2.25	0.46	1.48	0.39	0.26	0.48	8.51	2.79	32.77
4	4.09	0.27	3.22	0.54	0.31	0.31	18.51	1.78	9.63
5	9.82	0.28	8.96	1.00	0.20	0.10	51.48	0.60	1.17
6	8.62	0.21	7.73	1.43	0.25	0.55	44.42	3.18	7.16
7	13.89	0.21	12.99	1.62	0.24	0.74	74.66	4.27	5.72
8	15.46	0.10	14.51	2.51	0.13	1.58	83.40	9.08	10.89

Tabla 6. Disminución de la afectación del dissipador de energía

Pendiente (%)	% Afectación	%Afectación de sedimentos	%Disminución de la afectación
2	45.28	3.11	93.12
3	50.88	2.79	94.52
4	55.73	1.78	96.80
5	61.19	0.60	99.01
6	74.22	3.18	95.72
7	75.95	4.27	94.38
8	77.66	9.08	88.31

En la **Figura 3** se representan los porcentajes de afectación con dispositivo y sin dispositivo.

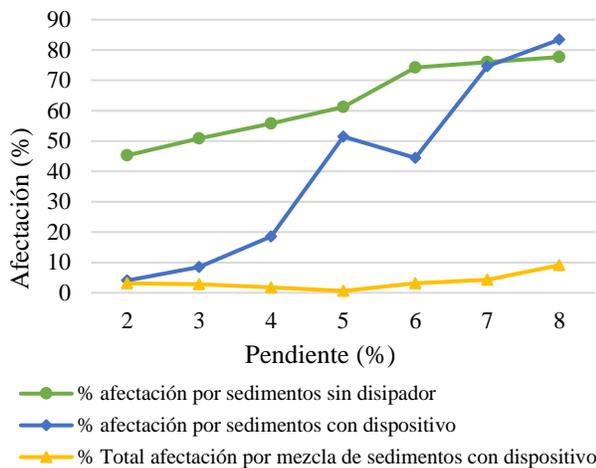


Figura 3. Influencia de la afectación con dispositivo vs sin dispositivo

Tal como se observa en la **Tabla 6**, el dispositivo rígido disipador de energía permite disminuir el porcentaje de afectación hasta en un 99% para pendientes de hasta un 5%, siendo estas representativas de cauces aluviales y zonas montañosas [26]. Por su parte, en lo presentado en la **Figura 3**, la alternativa de disipador de energía reduce notablemente la afectación de los sedimentos luego de la disposición de la estructura en comparación con la mezcla total, así como de la afectación sin dispositivo.

De esta forma, se determina que la disposición de una estructura rígida disipadora de energía representa una alternativa altamente viable para la disminución del riesgo, siendo esta hasta de un 88.31% para la pendiente máxima analizada (8%), lo cual es representativa en comparación con la afectación inicial sin la presencia del dispositivo, lo que se traduce en la reducción del índice de riesgo en zonas de amenaza alta por flujos de avalancha y detritos o hiperconcentrados, esto de conformidad con lo presentado por Uparela [27], en el que se analizan metodologías para evaluar riesgos por flujos de avalancha y la reducción del índice de riesgo en zonas de amenaza alta, lo que denota la importancia de plantear e implementar alternativas para mitigar la problemática y los impactos negativos generados [27].

4. Conclusiones

De acuerdo con lo observado en la literatura, el flujo de avalancha por detritos e hiperconcentrados se presenta con mayor incidencia en zonas tropicales, principalmente en áreas montañosas, lo cual genera un mayor índice de

riesgo y una amenaza alta para las áreas urbanas aledañas, poniendo en riesgo a la población y aumentando las pérdidas económicas, sociales y ambientales denotando la importancia del análisis, planteamiento e implementación de alternativas para afrontar la problemática generada y, con esto, disminuir el porcentaje de afectación del área de estudio.

La implementación del modelo experimental permite determinar las características adecuadas para mejorar la funcionalidad de la estructura, así como del análisis del comportamiento de los flujos de avalancha por detritos e hiperconcentrados bajo las condiciones del modelo; por su parte, el factor de escala determinado, la evaluación y comparación de condiciones de similitud bajo tres leyes hidráulicas (geométrica, cinemática y dinámica) permite abarcar y ampliar las características del entorno, de mayores escalas del modelo empleado, siendo esto de gran utilidad para el análisis del comportamiento de los flujos de avalancha en escenarios de gran escala, como de mayores pendientes a las tenidas en cuenta en la investigación.

Se determina que la disposición y selección adecuada de la estructura, así como la rigidez de la misma en función a las condiciones del entorno, permite determinar adecuadamente el tipo de estructura, dimensionamiento y separación con respecto a la ubicación aguas arriba y aguas debajo de la zona de estudio, ya que de esto depende la funcionalidad de la estructura y eficacia en la disminución de la velocidad de flujo y, por ende, de la afectación sobre el área de estudio en zonas tropicales las cuales presentan mayor susceptibilidad a flujos de avalancha por detritos e hiperconcentrados.

Recomendaciones

Se recomienda analizar la alternativa de disipador rígido de energía en condiciones de sedimento diferente, variando el diámetro medio, composición en volumen y tipo de lecho. Así mismo, se recomienda analizar la influencia y funcionalidad de la estructura en escalas de laboratorio mayores, así como también, variando el factor de escala en modelos numéricos de simulación.

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento a la Universidad Francisco de Paula Santander, por el apoyo técnico en el desarrollo de la fase experimental.

Financiación

La investigación se desarrolla con apoyo de recursos en especie de la Universidad Francisco de Paula Santander.

Contribución de los autores

N. J. Cely-Calixto: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Validación, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Todos los autores han leído y están de acuerdo con la versión publicada del artículo.

Conflicto de interés

El autor declara que no tiene ningún conflicto de interés con relación al desarrollo de la investigación, ya sea de carácter personal, económico, de autoría o cualquier otro tipo, que pueda afectar el desarrollo o publicación de la investigación y los resultados aquí presentados.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] V. Gibiat, E. Plaza, “Estudio experimental de emisiones acústicas precedentes a avalanchas granulares,” *Interciencia*, vol. 35, no. 11, pp. 807–811, 2010.
- [2] A. Sepúlveda, J. Patiño, C. E. Rodríguez, “Metodología para evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia: caso Útica, Cundinamarca, Colombia,” *Obras y Proyectos*, vol. 20, pp. 31–43, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132016000200003>
- [3] R. López, “Características hidráulicas y geomorfológicas de ríos de montaña (III),” *Cimbra*, no. 363, pp. 28–32, 2005.
- [4] J. Suarez, “Análisis de Estabilidad,” *Flujos de deslizamientos: análisis geotécnico*. Cap. 4, 2009, pp. 127–172.
- [5] Y. Vargas-Peñaranda, N. Cely-Calixto, G. Carrillo-Soto, “Estimación de caudales extremos no instantáneos en cuencas de la región nororiental andina de Colombia,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 23, no. 2, 2024, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v23n2-2024008>
- [6] H. Y. Chona-Jurado, N. J. Cely-Calixto, G. A. Carrillo-Soto, “Comparación obras de reducción del riesgo sobre áreas de amenaza alta por inundación sobre un sector de la Quebrada Tonchala en San José de Cúcuta,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 22, no. 3, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n3-2023012>
- [7] C. García-Hernández, J. Ruiz-Fernández, C. Sánchez-Posada, S. Pereira, M. Oliva, “An extreme event between the little ice age and the 20th century: The snow avalanche cycle of 1888 in the Asturian Massif (Northern Spain),” *Geographical Research Letters*, vol. 44, no. 1, pp. 187–212, 2018, doi: <http://doi.org/10.18172/cig.3386>
- [8] D. Z. Pivalica Cisternas, “Sistemas de contención de aluviones para la quebrada de Lo Cañas en la comuna de La Florida,” Universidad Andrés Bello, Chile, 2017.
- [9] R. López, “Hidrotecnicas para la gestión de acarreo en cauces de montaña,” *Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Forestales*, 1999.
- [10] M. A. Vergara, *Técnicas de modelación en hidráulica*. México: México: Alfaomega, 1996.
- [11] G. Aldana and J. Pérez, “Simulación del patrón de flujo y del tiempo de retención hidráulico en lagunas de estabilización y reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA) a través de un modelo físico,” *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, vol. 33, no. 1, pp. 48–58, 2010.
- [12] T. Shu-tang, W. Feng, “The fundamental equations of two-dimensional layer flows,” *Appl Math Mech*, vol. 7, no. 9, pp. 835–840, 1986, doi: <https://doi.org/10.1007/BF01898125>
- [13] M. Cruz Fernández, “Evaluación de la velocidad en un canal abierto mediante las ecuaciones de factor de fricción de Darcy-Weisbach, Chezy y Manning-Ayacucho-2016,” 2016.
- [14] J. Suárez, *Control de erosión en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, 2001.
- [15] M. Bravo-Espinosa, W. R. Osterkamp, V. L. Lopes, “Transporte de sedimentos en corrientes naturales: revisión técnica de ecuaciones empíricas de predicción del arrastre de sedimentos de fondo,” *Terra Latinoamericana*, vol. 22, no. 3, pp. 377–386, 2004.

- [16] J. D. Brea, F. Balocchi, *Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas*. UNESCO Office Montevideo and Regional Bureau for Science in Latin America and the Caribbean, Universidad de Talca, 2010.
- [17] J. Aguirre-Pe, M. L. Olivero, A. T. Moncada, “Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente,” *Ingeniería del agua*, vol. 7, no. 4, pp. 353–365, 2000, doi: <https://doi.org/10.4995/ia.2000.2851>
- [18] R. J. S. Whitehouse, R. L. Soulsby, J. S. Damgaard, “Discussion of ‘inception of sediment transport on steep slopes’ by Richard JS Whitehouse, Richard L. Soulsby, and Jesper S. Damgaard,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 126, no. 7, pp. 553–555, 2000, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2000\)126:7\(553.2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:7(553.2))
- [19] E. Meyer-Peter and R. Müller, “Formulas for bed-load transport, paper presented at 2nd Meeting of International Association for Hydraulic Research,” *Int. Assoc. for Hydraul. Res., Stockholm*, 1948.
- [20] J. E. Quiroga-méndez, C. A. Sierra-Gallo, G. E. Blanca-Gutierrez, “Análisis del ariete hidráulico para diferentes configuraciones,” *Rev. UIS Ingenierías*, vol. 12, no. 2, pp. 29–34, 2013.
- [21] B. D. Quintana, Y. Cáceres, “Análisis del comportamiento hidráulico del dispositivo clauzel como disipador de energía para sedimentos presentes en flujos de avalanchas en zonas tropicales,” Trabajo de grado – Pregrado, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, 2017.
- [22] W. A. Tuñoque, “Riesgo cuantitativo por flujo de detritos desencadenados por precipitaciones pluviales en la microcuenca Sahuanay, distrito de Tamburgo - Abancay - Apurímac, 2023,” Trabajo de grado, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Abancay, 2023.
- [23] U. A. Khan, R. Valentino, “Investigating the granulometric distribution of fluvial sediments through the hybrid technique: case study of the Baganza River,” *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 9, May 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/w14091511>
- [24] V. J. Niño, “Comparación de criterios de engrosamiento del flujo para la simulación de avalanchas en casos colombianos de estudio,” Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2015.
- [25] A. Ahmed, A. R. Ghumman, “Experimental investigation of flood energy dissipation by single and hybrid defense system,” *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 10, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/w11101971>
- [26] P. A. Basile, *Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales*, Rosario: UNR EDITORA, 2018. [Online]. Available: www.unreditora.edu.ar
- [27] J. E. Uparela, “Metodología para la evaluación del riesgo por flujos de lodos y avalanchas en Colombia,” Trabajo de grado, Escuela de Ingenieros, 2017.