

# Diseño del aliviadero escalonado convergente de la presa Toma Grande con modelamiento numérico 3D

## Design of the converging stepped spillway of the Toma Grande Dam with 3D numerical modeling

Gideael Quislón Cántaro Fabián<sup>1,a</sup>, Samuel Ismael Quisca Astocahuana<sup>1,b</sup>

Recibido: 01/03/2023 - Aprobado: 04/05/2022 – Publicado: 02/06/2023

### RESUMEN

Este estudio se enfoca en el diseño de un aliviadero escalonado de sección variable convergente utilizando el modelamiento numérico tridimensional con el objetivo de encontrar el dimensionamiento hidrodinámico óptimo y una disipación de la carga hidráulica eficiente en aliviaderos escalonados, para lo cual se evaluaron diferentes alternativas a partir de un aliviadero de sección constante y se compararon los parámetros hidráulicos para determinar la operación hidráulica adecuada. Los resultados muestran que la contracción de la sección aguas abajo permite una disipación adicional de energía, lo que es importante para mejorar el rendimiento hidráulico de los aliviaderos escalonados. Los modelos fueron calibrados con el experimento de laboratorio realizado por Arosquipa et al. (2022). Estos hallazgos abren la puerta a futuras investigaciones y mejoras en el diseño de aliviaderos escalonados convergentes, lo que es crucial en la gestión de recursos hídricos en proyectos hidráulicos, especialmente en situaciones críticas previstas debido al cambio climático y sin incurrir en mayores gastos.

**Palabras claves:** Hidráulica, aliviadero, escalonado, convergente, modelamiento, tridimensional, presas.

### ABSTRACT

This study focuses on the design of a converging variable section stepped spillway using three-dimensional numerical modeling with the objective of finding the optimal hydrodynamic sizing and efficient hydraulic load dissipation in stepped spillways, for which different alternatives were evaluated from a constant section spillway and the hydraulic parameters were compared to determine the appropriate hydraulic operation. The results show that the contraction of the downstream section allows for additional energy dissipation, which is important for improving the hydraulic performance of stepped spillways. The models were calibrated with the laboratory experiment conducted by Arosquipa et al. (2022). These findings open the door for future research and improvements in the design of converging stepped spillways, which is crucial in water resource management in hydraulic projects, especially in critical situations expected due to climate change and without incurring higher costs.

**Keywords:** Hydraulics, spillway, stepped, convergent, modeling, three-dimensional, dams.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado, Lima, Perú.

a Bachiller en Ingeniería Civil, Tesista Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Autor para correspondencia: [gideael.cantaro@unmsm.edu.pe](mailto:gideael.cantaro@unmsm.edu.pe) - ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1432-7884>

b Doctor en Ingeniero Civil, Profesor principal de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Email: [squiscaa@unmsm.edu.pe](mailto:squiscaa@unmsm.edu.pe) - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2477-9306>

## I. INTRODUCCIÓN

Los aliviaderos son estructuras hidráulicas conexas a una presa, que tiene la función de evacuar de forma controlada los caudales excedentes que ingresan al embalse que conforma la presa. El diseño, construcción y la operación de los aliviaderos son temas de gran interés en la ingeniería hidráulica y en la seguridad hidrológica de las presas. El diseño de un aliviadero con eficiente disipación de la energía hidráulica es un reto actual para la ingeniería de presas y las obras hidráulicas. Cántaro y Quisca (2021) sostienen que los aliviaderos escalonados son una alternativa atractiva como componente de las presas de gran altura y capacidad de almacenamiento del embalse, debido a que la disipación eficiente de la carga hidráulica reduce el dimensionamiento de la poza disipadora y de la estructura del aliviadero en general. El aliviadero escalonado consiste en una serie de escalones dispuestos en el fondo del canal del aliviadero, que actúan como macrorugosidades y forman núcleos de vorticidades disipadores de la energía del flujo, y reducen la velocidad del flujo de agua en pie de salida del aliviadero, reduciendo drásticamente su velocidad y capacidad erosiva respecto a los aliviaderos convencionales. Sin embargo, el análisis hidráulico y diseño de los aliviaderos escalonados requieren de modelamiento hidráulico a escala reducida, y/o modelamiento numérico del flujo de agua en el aliviadero escalonado. Se presenta el modelamiento hidráulico computacional 3D de los aliviaderos escalonados de sección constante y convergente, para el diseño de la presa Toma Grande de 50 m de altura, localizado en Mollebaya, Arequipa.

De acuerdo con Chanson (1994) se reporta la construcción de un aliviadero escalonado realizada en la presa Sosnovsky en el año 1976, construido con bloques prefabricados de concreto superpuestos en la Ex URSS. En occidente, el estudio de este tipo de aliviaderos se intensificó en la década de los años 90 del siglo pasado. La disipación de energía hidráulica por escalones en aliviaderos fue estudiada por autores, como Christodoulou (1993), Chanson (2004), entre otros. Según Chen et al (2019) las paredes laterales convergentes tienen un impacto significativo en las características del flujo rasante, generando ondas estacionarias en la superficie libre, curvando las líneas de corriente principal y distorsionando las rotaciones del fondo.

San Mauro et al. (2020) utiliza el modelamiento y simulación numérica 3D para evaluar alternativas de diseño para el control de máximas avenidas en la presa de Oroville en California. Llegaron a la conclusión de que el aliviadero con cajero lateral convergente era una buena opción, y que un estanque amortiguador podía mejorar su eficacia en la rehabilitación del aliviadero de emergencia de la presa de Oroville.

Por otro lado, Reisi Dehkordi et al. (2015) estudiaron el efecto del ángulo de convergencia lateral en las características del flujo aguas abajo de un aliviadero escalonado. Con este fin, realizaron experimentos con un modelo físico y descubrieron que al aumentar el ángulo de convergencia lateral se producían mayores velocidades, mayores índices de cavitación, mayor profundidad de flujo y mayor presión cerca de la pared del aliviadero.

Hunt et al (2012) realizó el estudio para el diseño de aliviaderos escalonados convergentes con muros laterales verticales, propuso criterios para su diseño. Encontró que la disminución gradual de la separación entre los muros laterales hacia la salida del aliviadero afecta la profundidad del flujo cerca del muro, a medida que aumenta la convergencia, también lo hace la profundidad del flujo en la pared.

Esta investigación propone una alternativa para la disipación de energía en caídas escalonadas, mediante el diseño de un aliviadero escalonado convergente con una cresta ancha y una base angosta. Para determinar la disipación óptima de energía hidráulica, utilizando un modelamiento numérico tridimensional con el software OpenFoam y calibrando los datos de los resultados de los experimentos en el modelo físico a escala reducida, realizados por Arosquipa et al (2022). Se comparará la eficiencia de la disipación de energía en caídas escalonadas de sección constante y secciones convergentes de diferentes formas, con el fin de encontrar la sección convergente óptima y los parámetros hidráulicos necesarios para su éxito. Este estudio puede conducir a mejoras en el diseño de aliviaderos escalonados convergentes en el futuro.

## II. MÉTODOS

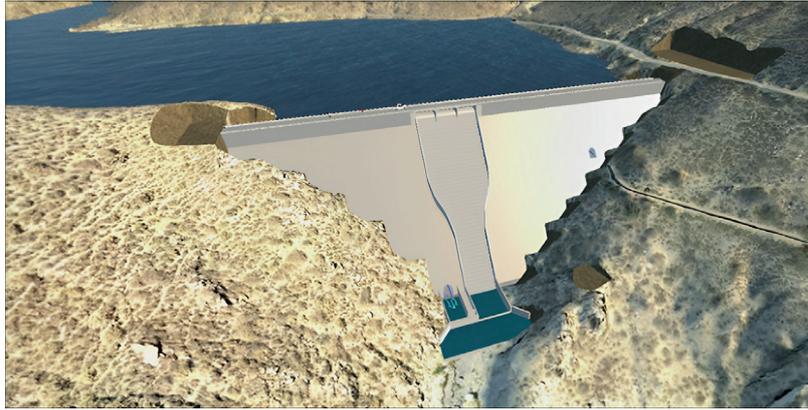
### 2.1 Definición de la geometría de la presa y el aliviadero

La presa de Toma Grande se encuentra ubicada en el distrito de Mollebaya, perteneciente a la provincia y departamento de Arequipa, en el sur del Perú. Para definir la ubicación del embalse y el tipo de presa a construir, se llevaron a cabo estudios previos de la cuenca Mollebaya, Quisca (2021) en el estudio hidrológico de la presa Toma Grande reporta las dimensiones del embalse de la presa Toma Grande, una superficie de 0.15 km<sup>2</sup> y una longitud de 0.986 km. Su volumen total es de 2.40 MMC (millones de metros cúbicos), de los cuales 1.9545 MMC son considerados como volumen útil, mientras que el restante 0.400 MMC es el volumen muerto, también se indican tres cotas de referencia: el NAMINO a una altura de 2,622.00 msnm, el NAMO a 2,642.00 msnm y el NAME a 2,644.01 msnm, Ver Figura 1, el uso del reservorio es para fines agrícolas.

En la Figura 1 se muestra el diseño de presa con una altura de 53 metros y una longitud y ancho de 155 y 5 m respectivamente, con una capacidad de embalse de aproximadamente 2.4 millones de metros cúbicos de agua. Además, contará con un sistema de compuertas y válvulas que permite controlar el flujo de agua hacia el río y las zonas de uso, esta obra permitirá mejorar la calidad de vida de las comunidades beneficiarias a través de la gestión del agua, garantizando la disponibilidad de este recurso para usos agrícolas y demás; así como defender de las posibles inundaciones y desastres naturales en un futuro impredecible debido al cambio climático.

### 2.2 Parámetros hidráulicos para el predimensionamiento de aliviadero de la presa Toma Grande

La Tabla 1 muestra los caudales máximos obtenidos en el estudio hidrológico de las avenidas para diferentes periodos



**Figura 1.** Emplazamiento del embalse y presa Toma Grande.

Fuente: Quisca (2021)

**Tabla 1.** Valores de caudal pico en la entrada y en la salida para diferentes valores de TR (Periodo de retorno). Fuente: Quisca (2021)

Periodo de retorno	Caudal pico - Entrada (m <sup>3</sup> /s)	Caudal pico - Salida (m <sup>3</sup> /s)
TR = 50	31.25	18.87
TR = 100	36.58	23.53
TR = 140	41.68	27.41
TR = 200	48.80	32.52
TR = 500	65.02	45.18
TR = 1000	80.17	57.43

Fuente: Quisca (2021)

de retorno, tanto en la entrada como en la salida del embalse. Para el diseño de presas grandes, se requiere modelar con caudales de un periodo de retorno de 1000 años, según las normas de la ICOLD (2013). En ese contexto, se realizó un modelamiento numérico del aliviadero escalonado con un caudal de 57.43 m<sup>3</sup>/s, y se evaluó el funcionamiento y las propiedades hidráulicas.

La sección convergente del aliviadero permite una mejor disipación de energía hidráulica, mejora la capacidad de evacuación, permite la instalación de descargas de fondo en el pie del aliviadero debido a que esta área al ser el aliviadero más angosta deja espacio para dichas instalaciones y minimiza el dimensionamiento de la poza disipadora al tener una menor energía residual al pie de la presa. Quisca (2021). En la Figura 2 se muestra el aliviadero escalonado de sección convergente curvo, y en la Figura 3 se presentan las dimensiones para el modelo con un ancho de cresta de 20 m la cual será evaluado en el modelamiento numérico tridimensional junto a otras propuestas que se muestran en la Figura 5.

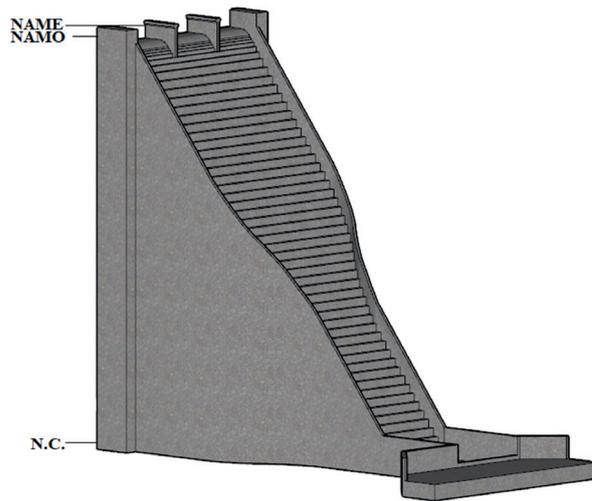
### 2.3 Características del flujo a lo largo de la caída escalonada.

En los aliviaderos escalonados, se presentan dos regímenes de flujo: el flujo rasante y el flujo escalón a escalón. El flujo rasante se refiere al agua que se desliza sobre los escalones, dividido en la corriente principal y la corriente recirculatoria, que disipa la energía; el flujo escalón a

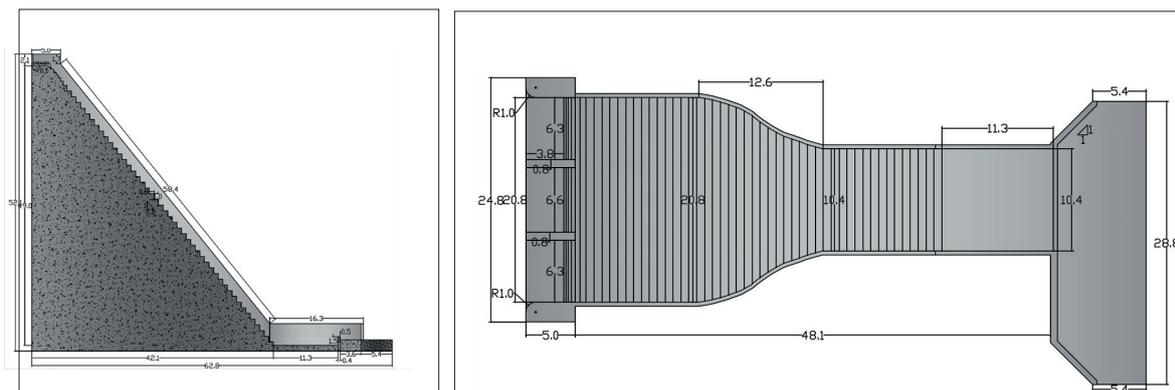
escalón se caracteriza por la formación de caídas de agua sucesivas en los escalones.

La formación de cada régimen de flujo depende de la pendiente del aliviadero, el caudal de descarga y el tamaño de los escalones. En el caso del diseño del aliviadero de la presa Toma Grande, se considera crítica la evacuación de un caudal de 57.43 m<sup>3</sup>/s para un periodo de retorno de 1000 años, con una pendiente de 0.8H:1.0V, lo que garantiza la formación de un flujo rasante. Por lo tanto, esta investigación se centrará en el estudio del régimen de flujo rasante, para lo cual se tendrán en cuenta los parámetros propuestos por distintos autores mediante fórmulas empíricas.

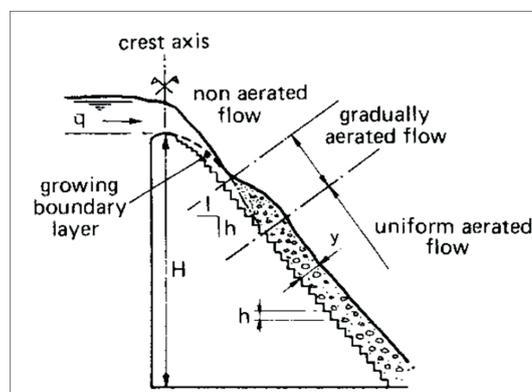
En la Figura 4, Bindo et al (1993) dividen al flujo rasante en aliviaderos escalonados en zonas con diferentes tipos de flujo, que incluyen no aireada, punto de aireación, rápidamente variado, gradualmente variado y flujo rasante, siendo este último el que presenta la mayor disipación de energía y parámetros hidráulicos constantes. Diferentes autores han realizado experimentos físicos para determinar las características hidráulicas de cada zona, como la ecuación propuesta por Amador et al. (2006) que relaciona la altura crítica del flujo con la altura (h) y longitud (l) del escalón para un talud de presa de 0.8H:1.0V. Las alturas no deben ser mayores que la altura máxima determinada por la ecuación (1).



**Figura 2.** Vista isométrica del aliviadero escalonado de sección convergente propuesta en la presa Toma Grande.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.** (a) Vista de perfil (izquierda) y (b) vista en planta derecha) del aliviadero propuesto en la presa Toma Grande.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.** Zonas de tipo de flujo en régimen rasante.  
Fuente: Bindo et al. (1993)

$$\frac{y_c}{h} = 0.854 * \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.169} \quad (1)$$

La Tabla 2 presenta las alturas máximas de escalón para anchos de aliviadero de 10, 15 y 20 metros y un caudal de 57.43 m<sup>3</sup>/s. Los valores de altura máxima de escalón son 1.81, 1.38 y 1.14 metros para cada uno de los anchos mencionados, respectivamente. Si se superan estos valores en el dimensionamiento del escalón, la disipación de energía en el flujo rasante no será óptima. Además, se obtuvieron tirantes críticos de 1.50, 1.14 y 0.94 m, respectivamente, para cada ancho inicial de cresta.

La zona no aireada se presenta desde el umbral de la cresta hasta el punto de inicio de aeración y se pueden calcular la altura crítica, altura crítica característica, el número de Froude y la macrorugosidad, Recopilados por Amador et al (2006) luego de un reajuste de las observaciones realizadas por autores como Chanson (2002) y Ohtsu et al. (2004).

$$d_c = \left(\frac{q_{dis}^2}{g}\right)^{1/3} \quad (2)$$

En la ecuación (2)  $d_c$  es la altura crítica para descargas unitarias adapta a aliviaderos escalonados.

$$\frac{(d_c)_{onset}}{h} = 1.057 - 0.465\left(\frac{h}{l}\right) \quad (3)$$

En la ecuación (3)  $(d_c)_{onset}$  es la altura crítica característica para dimensiones del escalón de altura  $h$  y ancho  $l$

$$F_r = \frac{q}{\sqrt{g \operatorname{sen} \alpha (h \cos \alpha)^3}} \quad (4)$$

En la ecuación (4)  $F_r$  es el número de Froude en aliviaderos de altura de escalón  $h$ .

$$k_s = h \cos \alpha \quad (5)$$

En la ecuación (5)  $k_s$  es la macrorugosidad en aliviaderos de altura de escalón  $h$ .

El punto de aireación ( $L_l$ ) y la altura del flujo ( $d_l$ ) se determinan con la ecuación de adaptada por Amador et al (2006). Donde en la ecuación (6)  $L_l$  es la distancia desde la cresta del aliviadero hasta alcanzar el punto de aireación, y en la ecuación (7) ( $d_l$ ) es la altura de flujo en el inicio del punto de aireación.

$$\frac{L_l}{k_s} = 9.719(\operatorname{sen} \alpha)^{0.0796} F_r^{0.713} \quad (6)$$

$$\frac{d_l}{k_s} = \frac{0.4034}{(\operatorname{sen} \alpha)^{0.04}} F_r^{0.592} \quad (7)$$

A partir de ahí, se forma un flujo rápidamente variado, donde se calcula la concentración media del aire con la fórmula empírica (8) propuesta por Matos (2000).

$$C_{med} = 0.163 F_r^{0.154} \quad (8)$$

En el tramo de flujo gradualmente variado, algunos autores como Boes y Hager (2003) no lo consideran, pero autores como Matos (1999) y Meireles (2004) estudiaron la evolución de la altura de agua equivalente en esta zona.

Finalmente, en la zona de flujo uniforme rasante, se puede hallar la altura uniforme en la zona de flujo rasante uniforme ( $d_0$ ) mediante la ecuación empírica (9) propuesta por Boes y Hager (2003) para aliviaderos con pendiente H: V 1:0.8:

$$\frac{d_0}{d_c} = 0.215 * \operatorname{sen} \alpha^{-1/3} \quad (9)$$

Estas ecuaciones son empíricas y se usaron para dimensionar el aliviadero escalonado de sección variable convergente, la verificación del funcionamiento óptimo se realizará con el modelamiento numérico tridimensional. La Tabla 3 presenta los parámetros hidráulicos relevantes en las diferentes zonas de flujo que se pueden encontrar en un aliviadero escalonado con régimen rasante

#### 2.4 Descripción del modelo numérico CFD

El software OpenFoam aplica el método CFD (Computational Fluid Dynamics) que es un método computacional que permite el cálculo por métodos numéricos a través de volúmenes finitos de fluido, simular flujos en diferentes situaciones. El programa se basa en la resolución de ecuaciones matemáticas que describen el movimiento y la interacción de los fluidos, utilizando métodos numéricos VOF (Volumen de fluido) para resolver estas ecuaciones en un dominio computacional discreto.

La ecuación de continuidad (10) para fluidos incompresibles se representa de la siguiente forma:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (10)$$

**Tabla 2.** Tabla comparativa de Caudal de diseño, profundidad crítica y altura de escalón máximo para distintos anchos de aliviadero.

Anchos de aliviadero	Descarga unitaria (m <sup>3</sup> /s.m)	Profundidad crítica (m)	Altura de escalón máximo (m)
<b>B1=10m</b>	5.74	1.50	1.81
<b>B2=15m</b>	3.83	1.14	1.38
<b>B3=20m</b>	2.87	0.94	1.14

Fuente: Adaptado de Amador et al (2006)

**Tabla 3.** Parámetros en las zonas de flujo en un aliviadero escalonado

Zonas y tipos de flujo	Parámetro	Valor
Inicio del flujo rasante	Altura crítica del flujo ( $y_c$ )	1.022 m
	Caudal crítico ( $q_c$ )	2.872 m <sup>2</sup> /s
Zona no aireada	Altura crítica ( $d_c$ )	2.034 m
	Altura crítica característica ( $d_c$ onset)	0.685 m
	Número de Froude ( $Fr$ )	1.989
	Macrorugosidad ( $K_s$ )	0.626 m
Punto de aireación	Distancia hasta el punto de aireación (L)	9.110 m
	Altura del flujo en el punto de aireación ( $d_i$ )	0.617 m
Flujo rápidamente variado	Concentración media del aire ( $C_{med}$ )	0.193
Flujo uniforme rasante	Altura uniforme en la zona de flujo rasante uniforme ( $h$ )	0.457 m

Fuente: Adaptado de Amador et al (2006)

Donde  $\nabla$  es el operador nabla y  $V$  es el vector de velocidad. Además, el modelo utiliza la ecuación de Navier-Stokes (11), que describe el comportamiento de los fluidos y su interacción con sólidos:

$$\rho (dV/dt) = -\nabla P + \mu \nabla^2 V + F \quad (11)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $t$  es el tiempo,  $P$  es la presión,  $\mu$  es la viscosidad dinámica,  $\nabla^2$  es el operador Laplaciano y  $F$  es una fuerza externa.

### 2.5 Metodología para el modelamiento numérico

Las etapas para el modelamiento hidráulico tridimensional del aliviadero escalonado inician con la construcción de 2 modelos geométricos de aliviaderos escalonados de sección constante (SC1-1 y SC1-2) y 4 modelos de sección convergente (SV1, SV2, SP1 y SP2), ver Figura 5, con dimensiones que se detallan en la Tabla 4.

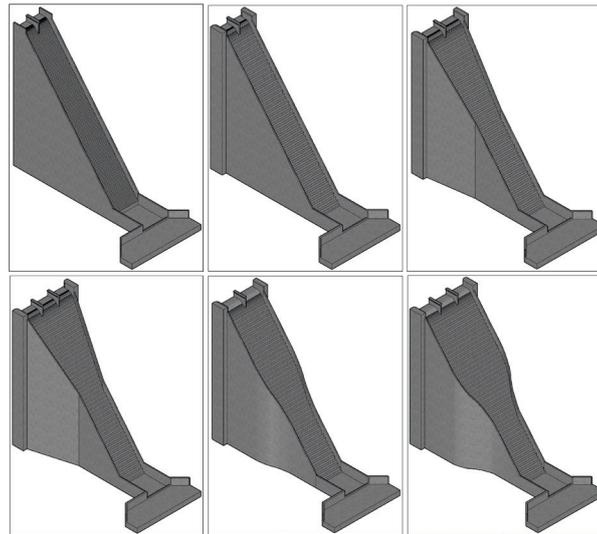
Se examinaron las características del flujo de en cada simulación con el fin de realizar una comparación y determinar cuál de las estructuras funciona de manera adecuada y permite una mayor disipación de energía.

La Figura 6 presenta el enmallado en donde se consideró el tipo de mallado no estructurado debido a la complejidad geométrica del modelo, refinando las dimensiones en zonas de interés como en la cara entre los escalones, se eligió un valor adecuado para garantizar la precisión del modelo y el razonable costo computacional. En este caso, se ha definido un tamaño de malla mínimo de 0.05 m para los ejes x, y, z. Las condiciones iniciales se refieren al estado inicial del sistema hidráulico. En este caso, se ha establecido una condición inicial de contenido de agua en el espacio geométrico “boxToCell” que representa un cubo en el inicio del flujo de entrada inicial, los puntos definen los dos esquinas opuestas del cubo. Ver Figura 7. En la Figura 8 se muestra las condiciones de borde definen cómo se comportará el flujo en los límites del sistema hidráulico. En este caso, se ha definido una condición de entrada de flujo (inlet) de 57.43 m<sup>3</sup>/s aguas arriba y una condición de salida (outlet) aguas abajo. Además, se ha establecido una condición de atmosphere en los límites en contacto con la atmosfera y wall en la base y muros del sistema hidráulico. Por último, se ha elegido un modelo de turbulencia k- $\epsilon$  / RNG para describir la turbulencia del flujo en el sistema hidráulico. Este modelo se basa en la ecuación de energía cinética y la ecuación de disipación de energía para modelar la turbulencia.

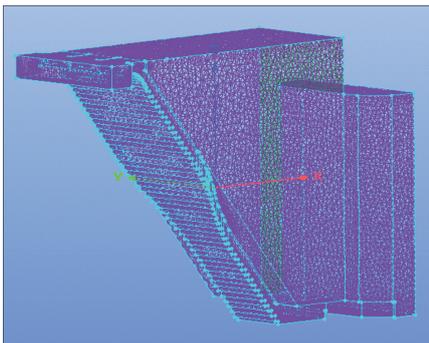
**Tabla 4.** Características geométricas de modelos de aliviaderos escalonados simuladas

Modelo	Tipo de aliviadero	Altura de presa (m)	Talud	Ancho superior (m)	Ancho inferior (m)	Altura escalones (m)	Base escalones (m)
SC1-1	Sección constante	50	0.8H:1V	10	10	0.5	0.4
SC1-2	Sección constante	50	0.8H:1V	10	10	1.0	0.8
SV1	Convergente lineal	50	0.8H:1V	15	10	1.0	0.8
SV2	Convergente lineal	50	0.8H:1V	20	10	1.0	0.8
SP1	Convergente curvo	50	0.8H:1V	15	10	1.0	0.8
SP2	Convergente curvo	50	0.8H:1V	20	10	1.0	0.8

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.** Geometría en 3D del aliviadero escalonado con distintas configuraciones, de izquierda a derecha: Superior (SC1-1, SC1-2, SV1), Inferior (SV2, SP1, SP2)  
Fuente: Elaboración propia

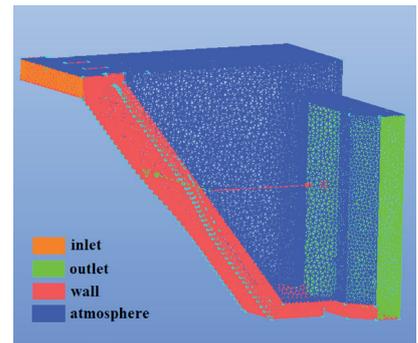


**Figura 6.** Enmallado no estructurado para el modelo numérico tridimensional.  
Fuente: Elaboración propia

```

..... C++ .....
*****
\\ / F field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / O peration | Website: https://openfoam.org
\\ / A nd | Version: 8
\\ / M anipulation |
.....
FoamFile
{
  version 2.0;
  format ascii;
  class dictionary;
  location "system";
  object setfieldDict;
}
// ..... //
defaultFieldValues
{
  volScalarFieldValue alpha.water 0
};
regions
{
  boxToCell
  {
    box (-5 6.3699 48) (0 31.1699 51.5800001);
    fieldValues
    {
      volScalarFieldValue alpha.water 1
    };
  };
};
// ..... //
    
```

**Figura 7.** Declaración de las condiciones iniciales para el modelo numérico tridimensional.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 8.** Condiciones de contorno para la simulación CFD en OpenFoam.  
Fuente: Elaboración propia

### III. RESULTADOS

#### 3.1 Evaluación del tamaño de escalones

Los modelos simulados SC1-1 y SC1-2 se realizaron para definir el tamaño adecuado para los escalones, el modelo SC1-1 con dimensiones de los escalones  $h=0.5$  m y  $l=0.4$  m y el modelo SC1-2 de  $h=1.0$  m y  $l=0.8$  m, el primer caso presenta una baja disipación de energía esto debido a que no se forma el flujo rasante adecuadamente, evitando la formación de núcleos disipadores de energía óptimas entre las caras de los escalones, la velocidad de entrega a la poza alcanza los 15 m/s, siendo esta una velocidad altamente erosiva, en la poza se forma resalto no amortiguado, entregando el flujo al cauce con velocidades

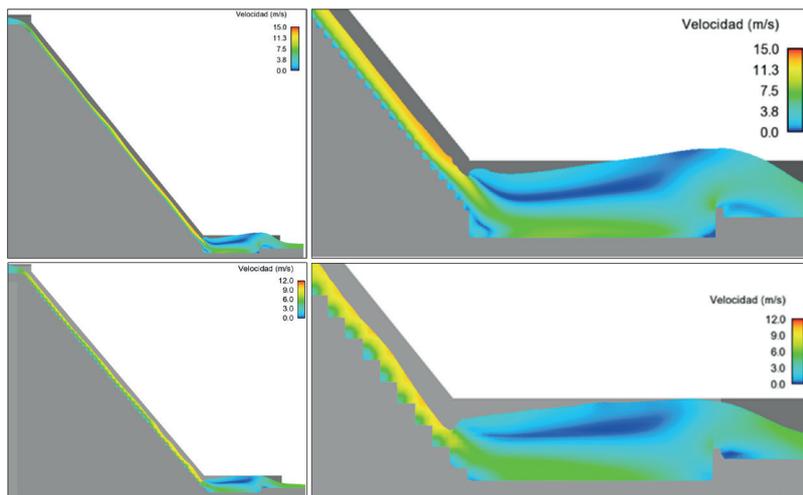
de 5-6 m/s. En cambio, el modelo SC1-2 presenta un mejor funcionamiento hidráulico, se forman núcleos disipadores de energía eficientes, prueba de ello es que las velocidades de entrega a la poza son de 11 m/s, la cual se disipa en esta hasta velocidades permisibles para la entrega al cauce, 3-4m/s. Ver Figura 9 y 10. Por lo tanto, El modelo SC1-2 presenta un mejor funcionamiento hidráulico y garantiza que las velocidades de entrega al cauce sean no erosivas.

#### 3.2 Evaluación de velocidades en los aliviaderos escalonados

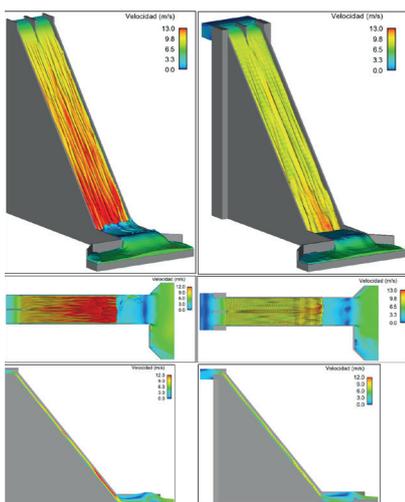
En la Figura 10 se muestran los resultados del campo de velocidades en 3D, perfil y planta del modelamiento numérico CFD para los casos de aliviaderos SC1-1 y SC1-2.

La Figura 11 muestra el resultado de las simulaciones para los casos de aliviaderos convergentes lineales SV1 y SV2. El modelo SV1 permite la formación de flujo rasante y muestra velocidades de hasta 13m/s que alcanzan en la entrega a la poza. La contracción lineal de los modelos SV1 y SV2 permite que se desarrolle un flujo contraído, donde la velocidad se concentra en el centro del aliviadero. Sin embargo, el flujo rasante no se conserva en la parte baja debido a la contracción constante

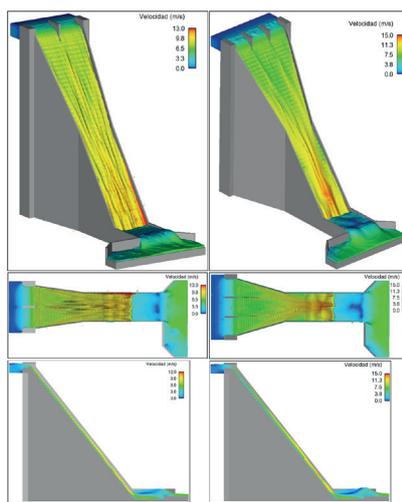
lineal. La poza disipadora entrega el flujo al cauce con velocidades de hasta 6m/s. Los modelos SP1 y SP2 de la Figura 12 muestran un comportamiento de contracción suave debido a la curvatura del cauce, presenta un mejor comportamiento del flujo en contracción y las velocidades altas se forman en la parte central del aliviadero. El flujo rasante se conserva permitiendo una mejor disipación de energía. La velocidad de entrega al cauce se encuentra entre 4 – 5 m/s.



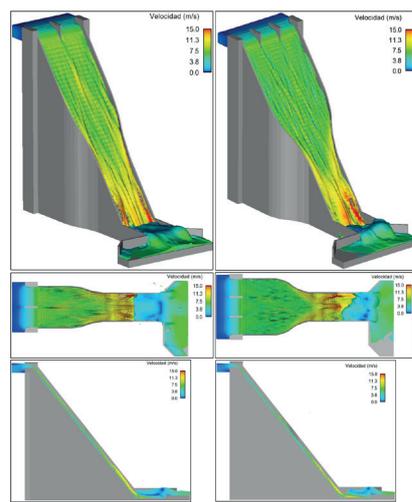
**Figura 9.** Resultados del modelamiento numérico 3D para el modelo SC1-1 con escalones 0.5V:0.4H. (superior) y el modelo SC1-2 con escalones de 1.0V:0.8H (inferior).  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 10.** Resultados de velocidades del modelamiento numérico 3D para el modelo SC1-1 (izquierda) y SC1-2 (derecha).  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 11.** Resultados de velocidades del modelamiento numérico 3D para el modelo SV1 (izquierda) y SV2 (derecha).  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 12.** Resultados de velocidades del modelamiento numérico 3D para el modelo SP1 (izquierda) y SP2 (derecha).  
Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Evaluación de tirantes en los aliviaderos escalonados

La Figura 13 muestra los modelos SC1-1 y SC1-2, donde se registran tirantes de hasta 1.8 m en los escalones. En la poza disipadora el modelo SC1-1 reporta tirante de 4.22 m, que sobrepasa los muros de la poza pre-dimensionada. En cambio, en el modelo SC1-2 se observa tirantes de hasta 3.8 m, siendo la altura de la poza de 4 m. Por lo tanto, el modelo SC1-2, con escalones 1V:0.8H presenta el comportamiento adecuado para el diseño. En la Figura 14, el modelo SV1, se observa tirantes de hasta 2.7 m en los escalones de manera vertical y hasta 1.6 m de manera paralela al talud, y un tirante de 3.7 m en la poza disipadora. Mientras que en el modelo SV2 se registra tirantes similares en los escalones con un leve incremento en la poza disipadora que alcanza los 3.9 m. El tirante en la entrega al cauce en ambos casos es permisible y controlado. Se observa que el tirante aumenta en con la contracción aguas abajo, y cerca a los muros laterales. En la Figura 15 se observan tirantes de los modelos SP1 y SP2, ambos casos presentan tirantes similares tanto en los escalones con un máximo de 2.8 en

vertical y 1.5 en paralelo al talud, y en la poza se registra tirantes máximos de 3.7 m, entregando al cauce tirantes permisibles. En las zonas de contracción y cerca de las paredes se registra un incremento gradual del tirante.

### 3.4 Evaluación de energía hidráulica en los aliviaderos escalonados

En las Figuras 16, 17 y 18 se presentan los resultados de la energía hidráulica total, la cual es esencial para analizar la disipación de energía. El modelo SC1-1 disipa energía hidráulica en menor medida que el modelo SC1-2 debido a que tiene escalones más pequeños que no permiten una formación adecuada de vórtices de disipación de energía. Por otro lado, el modelo SV2 disipa mayor energía que el modelo SV1 debido a una mayor contracción (de 20m a 10m), lo que resulta en una disipación de energía de hasta el 85% - 88% de la energía hidráulica total. Asimismo, en los modelos de aliviaderos convergentes curvos, el modelo SP2 disipa más energía que el modelo de aliviadero SP1, con ambas disipaciones en el rango del 85% - 91% de la energía hidráulica total.

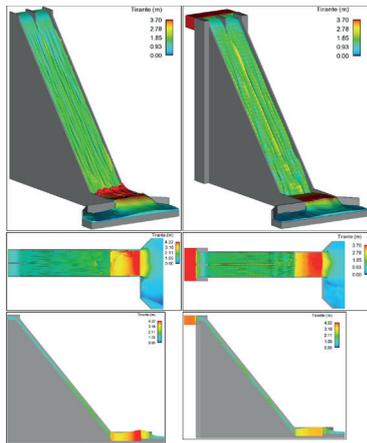


Figura 13. Resultados de tirantes del modelamiento numérico 3D para el modelo SC1-1 (izquierda) y SC1-2 (derecha). Fuente: Elaboración propia

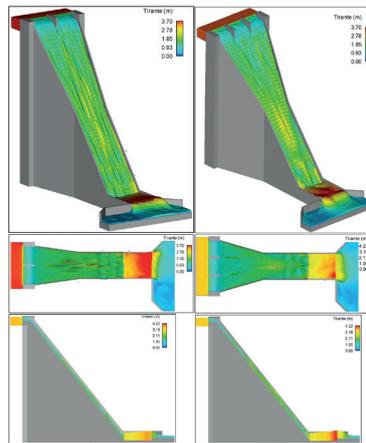


Figura 14. Resultados de tirantes del modelamiento numérico 3D para el modelo SV1 (izquierda) y SV2 (derecha). Fuente: Elaboración propia

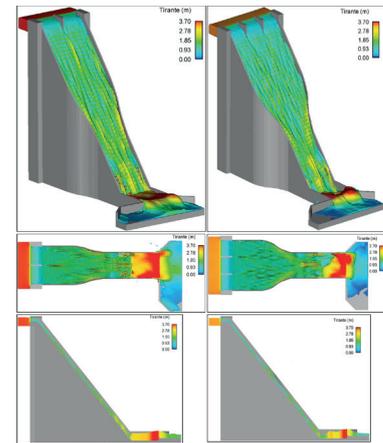


Figura 15. Resultados de tirantes del modelamiento numérico 3D para el modelo SP1 (izquierda) y SP2 (derecha). Fuente: Elaboración propia

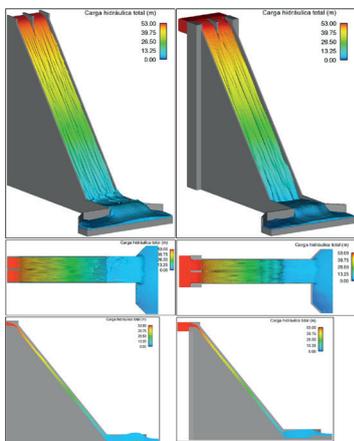


Figura 16. Resultados de tirantes del modelamiento numérico 3D para el modelo SP1 (izquierda) y SP2 (derecha). Fuente: Elaboración propia

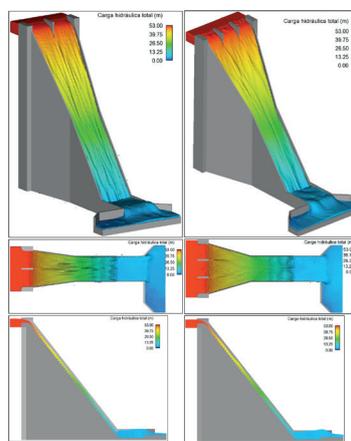


Figura 17. Resultados de tirantes del modelamiento numérico 3D para el modelo SP1 (izquierda) y SP2 (derecha). Fuente: Elaboración propia

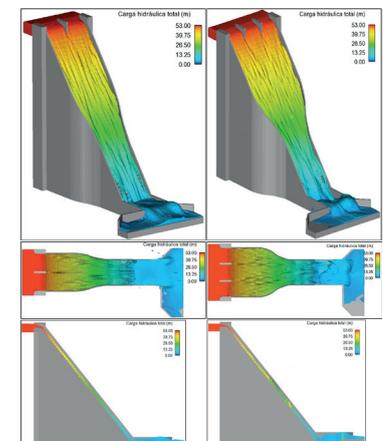


Figura 18. Resultados de tirantes del modelamiento numérico 3D para el modelo SP1 (izquierda) y SP2 (derecha). Fuente: Elaboración propia

### 3.5 Calibración del modelo numérico

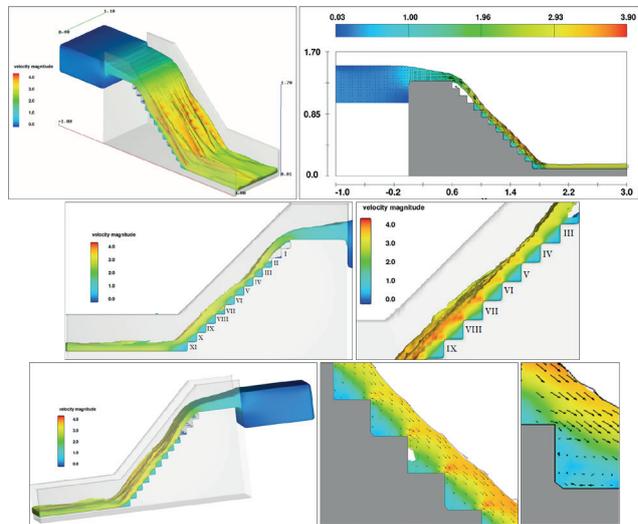
La simulación en el software OpenFoam con el método numérico VOF y bajo las mismas condiciones empleadas en el estudio de los 6 modelos de esta investigación, muestra una gran similitud física del flujo para las condiciones experimentadas en el laboratorio del prototipo a escala reducida. Las dimensiones de escalones eran de 0.01 m de alto y 0.01 m de longitud, el ancho de aliviadero de 1 metro y la caída de 1 m (ver Figura 21). Este estudio se realizó en el laboratorio de la Universidad de Queensland, Australia, por Arosquipa et al (2022), y es un tipo de calibración con enfoque de comparación de los resultados del modelo con datos experimentales. En términos numéricos el flujo alcanza velocidades de 2.5 - 3m/s en la simulación y en el laboratorio alcanza los 3 m/s. Asimismo, el tirante alcanza 0.07 m paralelo a la

pendiente del vertedero, lo que se puede constatar en el modelo de laboratorio.

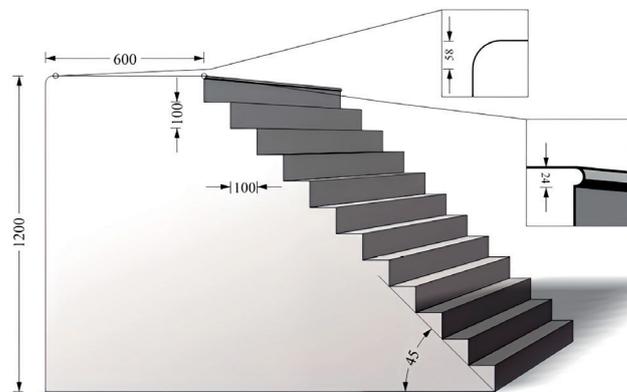
Estos resultados del modelo numérico y del laboratorio muestran similitudes físicas e hidráulicas como se muestran en las Figuras 19 y 20. Por lo tanto, se calibró y validó el modelo numérico utilizado en las simulaciones, por el principio de generalización de los resultados experimentales, De esta manera se logró que el modelamiento de los aliviaderos convergentes presentara un comportamiento similar en el campo físico. Una vez calibrado, el modelo se puede utilizar para predecir el comportamiento del flujo en diversas condiciones y configuraciones del sistema hidráulico. Es importante tener en cuenta que un modelo solo es preciso en las condiciones para las que está calibrado.



**Figura 19.** Resultados del experimento en aliviadero escalonado a escala para la calibración del modelamiento.  
Fuente: Arosquipa et al (2022)



**Figura 20.** Resultados del modelamiento numérico 3D para el modelo de laboratorio para fines de calibración.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 21.** Esquema hidráulico del vertedero escalonado de laboratorio U. Q., unidades en milímetros.  
Fuente: Arosquipa et al (2022)

#### IV. CONCLUSIONES

El aliviadero escalonado convergente con un ancho de descarga en la cresta de 20 m y un ancho de 10 m en el pie de la presa permite optimizar la disipación de la energía hidráulica, reduciendo las dimensiones de las estructuras de disipación en el pie del aliviadero. Los modelos SC1-1 y SC1-2 son aliviaderos escalonados no convergentes, mientras que los modelos SV1, SV2, SP1 y SP2 son aliviaderos convergentes. Estos últimos evidencian un comportamiento de flujo no uniforme debido a la contracción, lo que permite una disipación adicional de energía hidráulica en la contracción y obtener menores energías residuales al pie de la presa.

En los aliviaderos convergentes el tirante de agua aumenta al lado de los muros laterales en contracción. Los modelos SV1 y SP1 permiten una disipación de energía hidráulica óptima, pero el caudal de descarga unitario es alto, mientras que los modelos SV2 y SP2 permiten una disipación de energía óptima y un caudal de descarga menor en la cresta al ser más ancho. La elección del aliviadero escalonado convergente de tipo SP2 permite adaptar el espacio topográfico al pie de la presa adecuadamente, con espacio para la caseta de válvulas, descarga de fondo y poza disipadora de dimensiones factibles.

Los resultados de las simulaciones realizadas para calibrar el modelamiento numérico del aliviadero escalonado de la presa Toma Grande muestran una notable similitud en términos físicos e hidráulicos con el experimento en modelo físico a escala reducida, realizado por Arosquipa et al. (2022). Se verifica la eficiencia en la disipación de la carga hidráulica en los aliviaderos escalonados, y es una eficaz obra conexas en el diseño de presas. En particular, los aliviaderos escalonados de geometría constante son eficaces en la disipación de energía a través de los núcleos de vorticidades que se forman entre los escalones. Sin embargo, en el caso de los aliviaderos con secciones convergentes desde la corona de la presa hasta el pie de esta, se requiere un reajuste del dimensionamiento de los escalones vertical y horizontal para lograr una disipación de energía hidráulica eficaz. Este estudio es un principio para futuras investigaciones en el campo de la ingeniería de presas y estructuras hidráulicas. Es necesario continuar investigando en este tema para ampliar los conocimientos y mejorar la eficiencia en la disipación de energía hidráulica con aliviaderos escalonados.

#### V. AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la FIGMMG, Universidad Nacional Mayor De San Marcos; a mi asesor de tesis Dr. Samuel Quisca Astocahuana por las sugerencias y aportes en este avance de la tesis de investigación; y a la empresa SQ&ICC, por las oportunidades e incentivos para el desarrollo de la presente investigación, así como por el apoyo de software y hardware de alto desempeño computacional.

#### VI. REFERENCIAS

- Amador, A., Sánchez Juny, M., & Dolz Ripollés, J. (2006). Diseño hidráulico de aliviaderos escalonados en presas de HCR. *Ingeniería Del Agua*, 13(4), 289–302. <https://doi.org/10.4995/ia.2006.10492>
- Arosquipa Nina, Y., Shi, R., Wüthrich, D., & Chanson, H. (2022). Air–Water Flows and Head Losses on Stepped Spillways with Inclined Steps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 148(11), 04022037.
- Bindo, M., Gautier, J., & Lacroix, F. (1993). The stepped spillway of M'Bali Dam. *International water power & dam construction*, 45(1), 35-36.
- Boes, R.M. and H.W. Hager, 2003. Hydraulic design of stepped spillways *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 129(9): 671-679. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:9\(661\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:9(661))
- Cántaro, G. y Quisca, S.I. (2021). 3D Computational Hydraulic Modeling of Stepped Spillways Variable Section for Gravity and RCC Concrete Dams. 2nd IAHR Young Professionals Congress. 30 November al 02 December 2021. <https://www.iahr.org/index/detail/528>
- Chanson, H. (1994). *Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways*. Pergamon Pr; 1st edition, December 1994, U.K. 292 pages <https://www.amazon.com/Hydraulic-Stepped-Cascades-Channels-Spillways/dp/0080419186>
- Chanson, H. (2002). Hydraulics of stepped channels with overflows. *Journal of hydraulic engineering*, 128(3), 262-272.
- Chanson, H. (Ed.). (2004). *Hydraulics of Open Channel Flow (Second Edition)* (pp. 512-527). Butterworth-Heinemann. ISBN 9780750659789. <https://doi.org/10.1016/B978-075065978-9/50031-3>.
- Chen, Y., Liu, G., Qian, S., Xu, H., Feng, J., & Wang, X. (2022). Effects of Converging Sidewalls on Skimming Flow over Converging Stepped Spillway. *Applied Sciences*, 12(15), 7868. <https://doi.org/10.3390/app12157868>
- Christodoulou, G. C. (1993). Energy dissipation on stepped spillways. *Journal of hydraulic engineering*, 119(5), 644-650. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1993\)119:5\(644\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:5(644))
- Hunt, S. L., Temple, D. M., Abt, S. R., Kadavy, K. C., & Hanson, G. (2012). Converging stepped spillways: Simplified momentum analysis approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(9), 796-802. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000584](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000584)
- ICOLD. (2013). Bulletin 164 - dam monitoring - instrumentation and measurements. Paris: International Commission on Large Dams. <https://www.icold-cigb.org/GB/publications/publications.asp>
- Matos, J. (1999). Emulsionamento de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus [Doctoral dissertation, Instituto Superior Técnico]. [https://bibliotecas.utl.pt/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=57830&shelfbrowse\\_itemnumber=453393](https://bibliotecas.utl.pt/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=57830&shelfbrowse_itemnumber=453393)

- Meireles I. (2004). Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões e energia específica residual em descarregadores de cheias em degraus. Tesis Doctoral: Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal. [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=RPYPGv4AAAAAJ&cstart=20&pagesize=80&citation\\_for\\_view=RPYPGv4AAAAAJ:UcHWp8X0CEIC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=RPYPGv4AAAAAJ&cstart=20&pagesize=80&citation_for_view=RPYPGv4AAAAAJ:UcHWp8X0CEIC)
- Ohtsu, I., Yasuda, Y., & Takahashi, M. (2004). Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. *Journal of hydraulic Engineering*, 130(9), 860-869. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282004%29130%3A9%28860%29>
- Quisca, S. (2021). Expediente técnico del proyecto mejoramiento del servicio de agua para riego – represa Toma Grande – sector Toma Grande, Mollebaya, Arequipa, Arequipa, Peru.
- Rajaratnam, N. (1990). Skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4), 587-591. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:4\(587\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:4(587))
- Reisi Dehkordi, S., Sarfaraz, R., & Zarrati, A. R. (2015). Experimental investigation of the effect of convergent angle on hydraulic parameters in lateral spillways. *Journal of Hydraulic Research*, 53(4), 471-479. [https://scholar.google.co.in/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=4XwzIXIAAAAJ&citation\\_for\\_view=4XwzIXIAAAAJ:2osOgNQ5qMEC](https://scholar.google.co.in/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=4XwzIXIAAAAJ&citation_for_view=4XwzIXIAAAAJ:2osOgNQ5qMEC)
- San Mauro, J., Salazar, F., Morán, R., Peraita, J., Toledo, M. Á., Conde, M. J., ... & Alcalde, F. (2017). Aliviaderos Con Cajeros Altamente Convergentes. Posible Solución Para La Presa De Oroville. Proceedings of the V Jornadas de Ingeniería del Agua, A Coruña, Spain, 24-26. [https://scholar.google.es/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=es&user=oevKQoMAAAAJ&citation\\_for\\_view=oevKQoMAAAAJ:hqOjcs7Dif8C](https://scholar.google.es/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=oevKQoMAAAAJ&citation_for_view=oevKQoMAAAAJ:hqOjcs7Dif8C)

### Contribución de autoría

Conceptualización: (Gideael Quislón Cántaro Fabián); Curación de datos: (Gideael Quislón Cántaro Fabián); Análisis formal: (Gideael Quislón Cántaro Fabián); Adquisición de fondos: (Samuel Ismael Quisca Astocahuana); Investigación: (Gideael Quislón Cántaro Fabián); Metodología: (Gideael Quislón Cántaro Fabián); Administración del proyecto: (Samuel Ismael Quisca Astocahuana); Recursos: (Gideael Quislón Cántaro Fabián); Software: (Samuel Ismael Quisca Astocahuana); Supervisión: (Samuel Ismael Quisca Astocahuana); Validación: (Gideael Quislón Cántaro Fabián); Visualización: (Gideael Quislón Cántaro Fabián); Redacción - borrador original: (Gideael Quislón Cántaro Fabián); Redacción - revisión y edición: (Samuel Ismael Quisca Astocahuana)

### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.