



# ESTUDIO EXPERIMENTAL DE FLUJOS TRANSITORIOS CON TRENES DE ONDAS EN CANALES DE RIEGO

Francisco Nicolás Cantero-Chinchilla<sup>1</sup>, Óscar Castro-Orgaz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Investigador postdoctoral, Área de Ingeniería Hidráulica, Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edf. Leonardo da Vinci, Córdoba 14071, España

<sup>2</sup>Profesor Titular, Área de Ingeniería Hidráulica, Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edf. Leonardo da Vinci, Córdoba 14071, España

[z12cachf@uco.es](mailto:z12cachf@uco.es)

## RESUMEN

Los flujos transitorios en canales de riego provocados por operaciones de emergencia con compuertas pueden acarrear la generación y propagación de trenes de ondas. Esto puede afectar a otros elementos de regulación y la seguridad de zonas colindantes, sobre todo cuando el flujo ondulatorio interactúa con estructuras hidráulicas de aforo. Los estudios hidrodinámicos de riesgo para este tipo de flujos requieren aplicar modelado hidráulico, siendo fundamental el uso de bases de datos para la calibración y validación de los modelos usados. Este trabajo presenta un estudio experimental de flujo transitorio en canales en presencia de trenes de ondas que viajan en ambas direcciones e interactúan con estructuras de aforo. El estudio se llevó a cabo en el laboratorio de ingeniería hidráulica de la Universidad de Córdoba, donde se usó una compuerta neumática de accionamiento rápido para la generación del flujo transitorio con trenes de ondas en el canal de ensayo. Los datos son procesados y analizados para identificar las características del transitorio hidráulico. La utilidad y uso de la base de datos proporcionada en este trabajo se demuestra con la calibración y validación de modelos hidráulicos de uso frecuente en hidráulica de canales abiertos para los datos presentados.

## Palabras clave

Canales de riego, Flujo transitorio, Modelado hidráulico promediado

## 1. INTRODUCCIÓN

Los flujos transitorios en canales de riego son habituales y se originan, principalmente, por operaciones de elementos de control tales como compuertas. Cuando se producen situaciones de operación eventuales, como por ejemplo el ajuste rápido de las aberturas de compuertas por maniobras de emergencia, pueden generarse trenes de onda en los flujos transitorios que viajan a diferente celeridad en ambos sentidos del flujo [1]. Estos trenes de ondas en flujos transitorios pueden viajar grandes distancias afectando a estructuras de aforo en el canal, a otros elementos de regulación y pudiéndose producir vertido de agua si la cota de la lámina de las ondas supera la cota de los cajeros en algún punto. Para los estudios de riesgos

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

hidroambientales, conocer con detalle el impacto de estos fenómenos en el entorno es, por tanto, fundamental.

El análisis del funcionamiento de canales requiere el estudio de la operación de compuertas, para lo que se recurre frecuentemente a ensayos de laboratorio [2,3] y al modelado hidráulico [4], dos métodos que son complementarios. En cuanto a ensayos de laboratorio de flujo en lámina libre se pueden encontrar bases de datos de experimentos de flujo en régimen estacionario [2] o transitorio [3]. Los primeros representan situaciones de operación habituales en estructuras hidráulicas, mientras que los segundos se usan para evaluar situaciones extraordinarias en canales, siendo especialmente relevante para realizar tests de estrés en modelos hidráulicos. Sin embargo, la generación de bases de datos de experimentos de flujo en régimen transitorio no es una tarea sencilla, requiriendo de instalaciones adecuadas e instrumental específico, por lo que no son fáciles de encontrar en la literatura para su uso en la validación de modelos hidráulicos en canales abiertos.

En este trabajo se presenta un estudio experimental de flujo transitorio con trenes de ondas interactuando con un vertedero en un canal de laboratorio simulando operaciones rápidas de compuertas. Para ello se emplea una compuerta de neumática de accionamiento rápido, generando un tren de ondas que se viaja por el canal de laboratorio reflejándose en una pared vertical y, posteriormente, interactuando con un vertedero. A través de un método experimental optimizado, se extraen y presentan datos experimentales de series temporales de la evolución de la superficie libre en cuatro estaciones de medida a lo largo del canal de laboratorio, seleccionadas para representar las características del transitorio hidráulico. Finalmente, se muestra un ejemplo del uso de estas series temporales para calibración y validación de modelos hidráulicos de uso frecuente en hidráulica de canales abiertos.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 OBJETIVOS**

El objetivo principal del trabajo es representar las características de los transitorios hidráulicos con trenes de ondas en canales de riego producidos por operaciones de compuertas y su interacción con estructuras de aforo a través de un estudio experimental de laboratorio. Para ello se proporcionan series de datos temporales en varias estaciones a lo largo del canal de laboratorio donde se realizó el ensayo e imágenes clave para entender todos los fenómenos implicados. Como objetivo secundario se pretende mostrar la utilidad del set de datos proporcionado para calibración y validación de modelos hidráulicos en canales abiertos.

### **2.1 MATERIALES Y MÉTODOS**

El ensayo experimental se realizó en las instalaciones del laboratorio de hidráulica del Área de Ingeniería Hidráulica, Departamento de Agronomía, de la Universidad de Córdoba. El canal tiene 15 m de largo, 0.405 m de ancho y 1 m de profundidad (figura 1). El canal está equipado con una compuerta neumática de accionamiento rápido que permite generar un flujo instantáneo con trenes de ondas. Como estructura hidráulica de aforo se instaló un vertedero con perfil Gaussiano en la posición central de la longitud del canal. La

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

caracterización matemática de la elevación del fondo del canal responde a la siguiente función a trozos:

$$z_b = \begin{cases} z_{bp} + z_{bg} + C & \text{si } x < 9.634\text{m} \\ z_{bp} + z_{bv} + C & \text{si } x \geq 9.634\text{m} \end{cases} \quad (1)$$

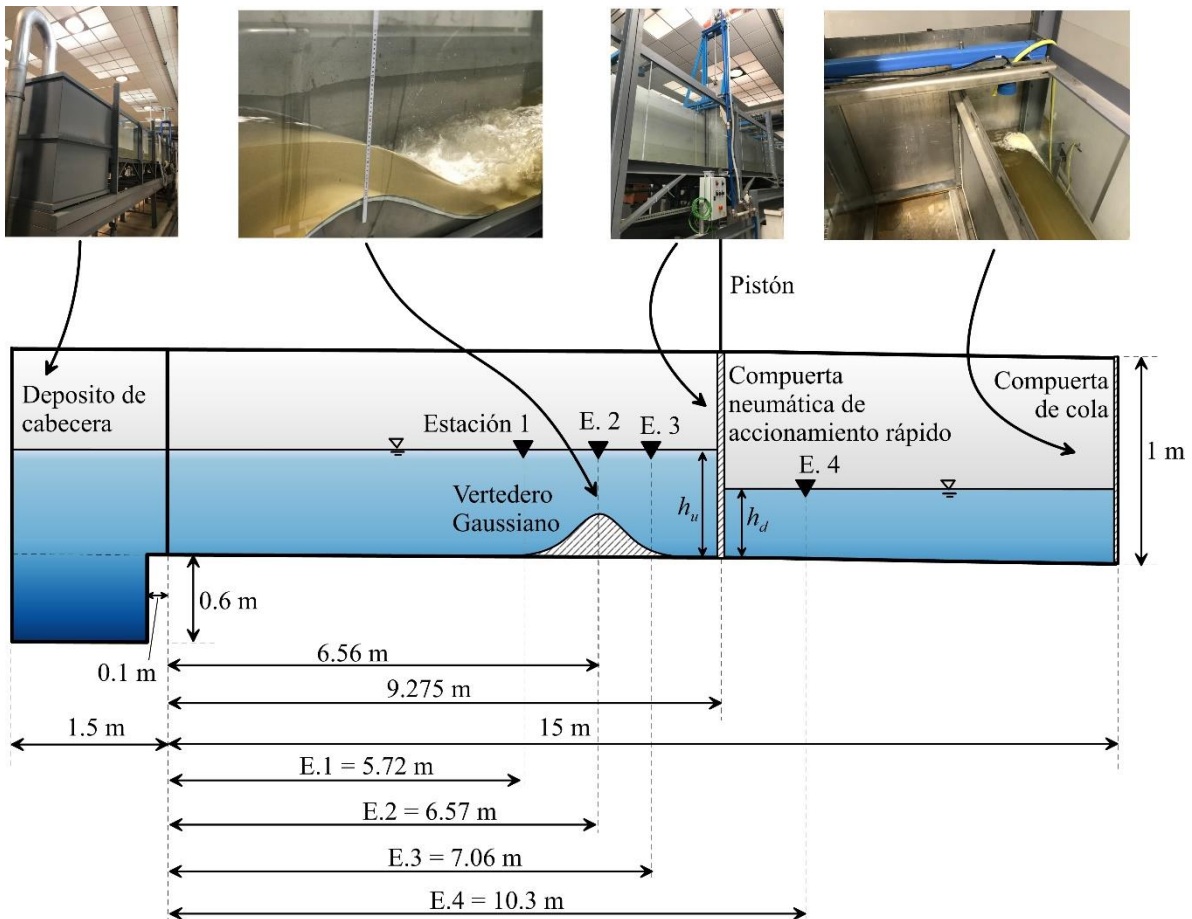
con

$$z_{bp} = -0.00015x \quad (2)$$

$$z_{bg} = 0.209e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-6.565}{0.254}\right)^2} \quad (3)$$

$$z_{bv} = -0.00001 \left[ (x-9.634)^4 - 4 \cdot 5.366(x-9.634)^3 + 6 \cdot 5.366^2(x-9.634)^2 \right] \quad (4)$$

donde  $x$  es la coordenada longitudinal,  $z_{bp}$  es la inclinación del fondo debido a la pendiente del mismo,  $z_{bg}$  es la elevación del fondo debido a la forma de lecho Gaussiana,  $z_{bv}$  es la deformación del fondo debido al voladizo de la última parte del canal y  $C = 0.014451$  es una constante sumada para trasladar el origen de la coordenada vertical a la posición de la compuerta neumática. Nótese que la posición del inicio del voladizo se estimó en  $x = 9.634$  m [ecuaciones (1) y (4)]. Los niveles de agua estática antes del experimento medidas justo aguas arriba y abajo de la compuerta neumática fueron de 0.295 m y 0.185 m,  $h_u$  y  $h_d$  respectivamente.



**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

*Figura 1. Dispositivo experimental de laboratorio*

La monitorización de los experimentos se realizó mediante el uso de 8 cámaras video Basler Ace acA1920-40uc, con objetivo de focal fija 6 mm y velocidad de funcionamiento a 25fps, que permitieron grabar cada ventana de inspección en el canal. Mediante el rectificado de la distorsión de las imágenes grabadas (debido principalmente a la focal de 6 mm, tipo ojo de pez) y la digitalización de la superficie libre en las estaciones de medida seleccionadas se generan las series de datos temporales. Estas estaciones de medida se ubicaron en posiciones clave a lo largo del canal que permiten capturar todas las características del transitorio hidráulico (Estación 1 en  $x = 5.72$  m, estación 2 en  $x = 6.57$  m, estación 3 en  $x = 7.06$  m y estación 4 en  $x = 10.3$  m) (figura 1).

### **3. RESULTADOS**

Las series temporales de datos de la superficie libre del flujo durante el experimento permiten evaluar los fenómenos producidos por la apertura rápida de la compuerta neumática, identificando características hidráulicas típicas de operaciones de compuertas en situación de emergencia, es decir, repentinas. La figura 2 muestra las dos series temporales correspondientes a las estaciones 1 y 2. En los datos se ha identificado el efecto de la onda de rarefacción procedente del flujo tipo rotura de presa generado por la apertura rápida de la compuerta neumática. También se han identificado los datos afectados por el tren de ondas reflejado por la compuerta de cola del canal, cerrada durante todo el experimento para permitir la reflexión del tren de ondas. Los fotogramas de algunos de los datos digitalizados se muestran a la derecha de la imagen, identificando el punto de la estación de medida y el fluido sobre el canal en sombra azul. La evaluación de estos fotogramas permite inferir que existe rotura de onda sobre la cresta del vertedero (estación 2) y niveles bajos de turbulencia aguas arriba (estación 1). Nótese que el nivel de agua sobre la cresta permanece prácticamente inalterado pasado el efecto de la onda de rarefacción hasta la llegada del tren de ondas reflejado ya que el calado en este punto está próximo al calado crítico y el caudal en la sección permanece prácticamente constante (figura 2b).

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

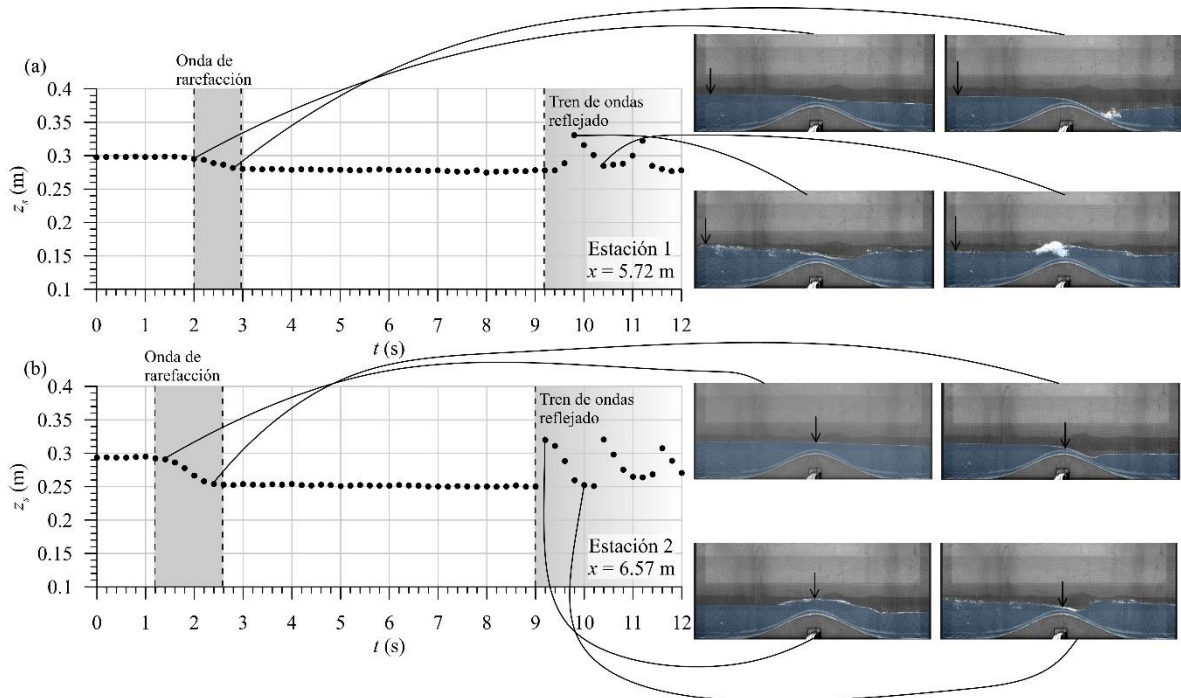


Figura 2. Series temporales de las dos estaciones aguas arriba del vertedero y características hidráulicas apoyadas con fotogramas del experimento

La figura 3 muestra las series temporales de la superficie libre del flujo en las estaciones 3 y 4, ambas aguas debajo del vertedero. La posición de la estación 3 permite evaluar no solo el efecto de la onda de rarefacción y el tren de ondas reflejado, sino también la evolución del resalto hidráulico generado al pie del vertedero. Los datos experimentales en la zona identificada como ‘Resalto hidráulico’ están, por tanto, dominados por la turbulencia. Los fotogramas que rodean a la gráfica permiten evaluar estos fenómenos de propagación de ondas y turbulencia. Por otro lado, la posición de la estación 4 permite evaluar el efecto del tren de ondas directo en la superficie libre, que deja una estela ondulatoria y/o turbulenta hasta que se recoge el efecto del tren de ondas reflejado. Los fotogramas permiten evaluar los fenómenos ondulatorios en esta estación, donde no hay interacción con estructuras hidráulicas de aforo y se puede observar rotura de onda.



## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

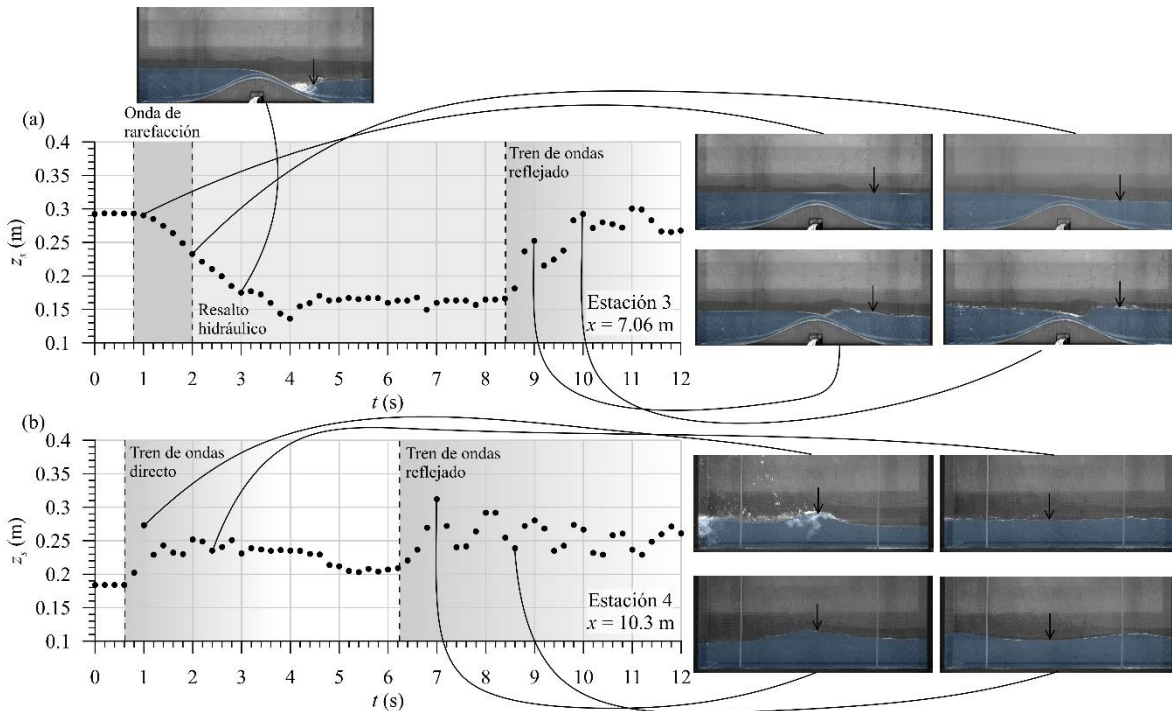


Figura 3. Series temporales de las dos estaciones aguas abajo del vertedero y características hidráulicas apoyadas con fotogramas del experimento

Estos datos permiten, por tanto, la calibración y validación de modelos hidráulicos de uso frecuente en hidráulica de canales. Dadas sus ventajas de tipo computacional, en este campo se usan mayoritariamente modelos promediados en la vertical para simular el flujo somero en canales. En esta sección, se usan dos modelos para la simulación de las series temporales en la figuras 2 y 3: (i) el modelo Saint-Venant [4], ampliamente usado en hidráulica de canales abiertos, y (ii) el modelo tipo VAM (Vertically-Averaged and Moment equations model) [5,6], que implementa expansiones de las variables del flujo en comparación con el anterior. Para la simulación numérica se usó el método descrito en Gamero et al. [7] para ambos modelos, con un paso de malla de 0.01 m y un paso temporal controlado por un número de Courant-Friedrich-Levy de 0.2 para garantizar estabilidad. El modelo de turbulencia y de tensiones de fondo se detalla en [7]. Los resultados de la simulación se muestran en la figura 4. En general, el modelo VAM mejora las simulaciones de los datos experimentales que resultan de la aplicación del modelo Saint-Venant debido al mayor grado de detalle en las variables del flujo. Esta mejora es evidente en las estaciones 1, 2 y 4, donde los fenómenos de rotura de onda y propagación de ondas son representados adecuadamente. En la estación 3 se observa que ningún modelo es completamente satisfactorio para la simulación de los datos afectados por turbulencia en el resalto hidráulico, lo que indica que los módulos de turbulencia considerados en [7] no son adecuados para realizar simulaciones precisas de estos fenómenos, cuya mejora constituye una línea de investigación abierta en este ámbito.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

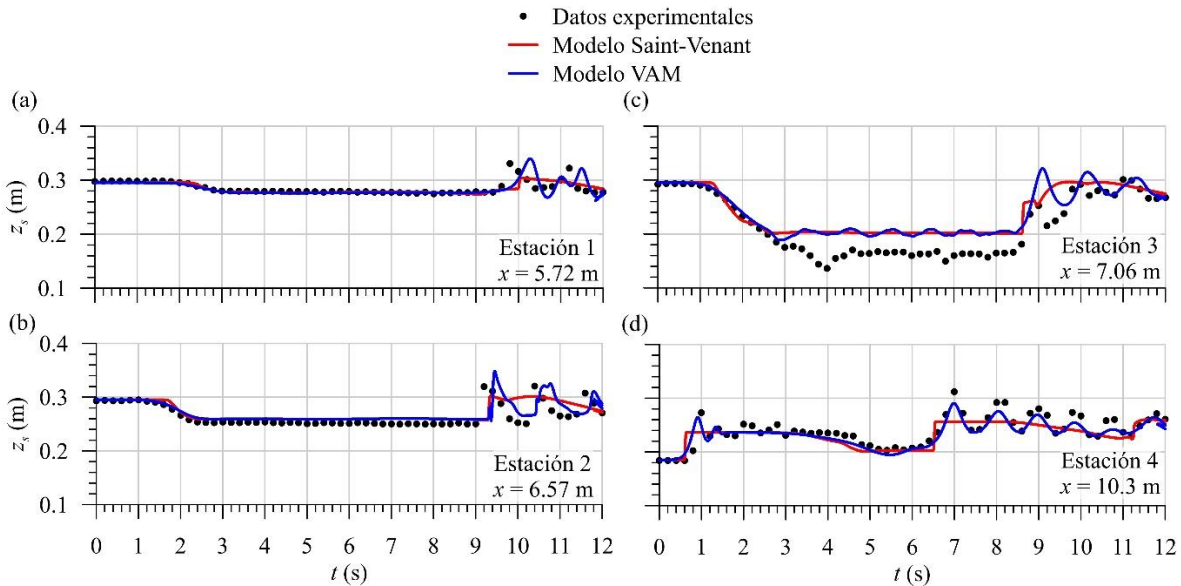


Figura 4. Simulación para calibración del experimento con los modelos Saint-Venant y VAM y comparación con las series de datos temporales

## 4. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un estudio experimental de flujos transitorios con trenes de ondas en canales de riego y su interacción con estructuras de aforo. Se detalla el estudio experimental y el método usado para la caracterización de la superficie libre. Las series de datos temporales producto del postproceso de las imágenes grabadas durante el experimento permiten caracterizar la transitorio hidráulico y localizar los fenómenos producidos por la apertura rápida de compuertas. El uso de esta base de datos resulta adecuado para la calibración y validación de modelos hidráulicos promediados de uso típico en canales abiertos, tales como el modelo Saint-Venant y el modelo VAM.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto de investigación nacional PID2020-114688RB-I00 y la ayuda María de Maeztu CEX2019-000968-M para Centros y Unidades de Excelencia en R&D del Departamento de Agronomía de la Universidad de Córdoba. El trabajo del primer autor ha sido parcialmente financiado por los fondos MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and NextGeneration EU/PRTR a través de una ayuda de excelencia Juan de la Cierva Incorporación (IJC2020-042646-I).

## REFERENCIAS

- [1] M. Kay, Practical hydraulics, CRC Press, 2007.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- [2] N. S. Sivakumaran, *Shallow-flow over Curved Beds*, Tesis doctoral, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1981.
- [3] H. Ozmen-Cagatay y S. Kocaman, “Dam-break flow in the presence of obstacle: experiment and CFD simulation”, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 5, no 4, Diciembre. 2011, 541-552.
- [4] O. Castro-Orgaz y W. H. Hager, *Shallow water hydraulics*, 1ra ed., Springer International Publishing, 2019.
- [5] P. M. Steffler y Y. C. Jin, “Depth averaged and moment equations for moderately shallow free surface flow”, *Journal of Hydraulic Research*, vol. 31, no 1, Febrero. 1993, pp. 5-17.
- [6] F. N. Cantero-Chinchilla, O. Castro-Orgaz, y A. A. Khan, (2018). “Depth-integrated nonhydrostatic free-surface flow modeling using weighted-averaged equations”, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 87, no 2, Mayo. 2018, pp. 27-50.
- [8] P. Gamero, F. N. Cantero-Chinchilla, R. J. Bergillos, O. Castro-Orgaz, y S. Dey, “Shallow-water lee-side waves at obstacles: Experimental characterization and turbulent non-hydrostatic modeling using weighted-averaged residual equations”, *Environmental Modelling & Software*, vol. 155, Septiembre. 2022, pp. 105422.