

Estudio de la superficie libre de resaltos hidráulicos en cuencos amortiguadores empleando técnicas LIDAR

Hydraulic jump free surface study in stilling basins employing LIDAR techniques

Juan Francisco Macián-Pérez ^{a,b1*}, Francisco José Vallés-Morán ^{b2}, Marco De-Rossi-Estrada ^{c1}, Santiago Sánchez-Gómez ^{b2} y Rafael García-Bartual ^{b3}

^aÁrea de Ingeniería Mecánica y Materiales, Centro Universitario EDEM - Escuela de Empresarios, Plaça de L'Aigua, s/n, La Marina de València, 46024, Valencia, España.

^bInstituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España.

^cInstituto Universitario de Restauración del Patrimonio, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España.

E-mail: ^ajuamapre@cam.upv.es, ^{b2}fvalmo@hma.upv.es, ^{c1}marco.de.rossi.industrial@gmail.com, ^{c2}santi.sg.arq@gmail.com, ^{b3}rgarciab@hma.upv.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 31/10/2023

Aceptado: 21/02/2024

Publicado: 30/04/2024

Citar como: Macián-Pérez, J.F., Vallés-Morán, F.J., De-Rossi-Estrada, M., Sánchez-Gómez, S., García-Bartual, R. 2024. Hydraulic jump free surface study in stilling basins employing LIDAR techniques. *Ingeniería del agua*, 28(2), 93-105. <https://doi.org/10.4995/la.2024.20621>

RESUMEN

El presente estudio busca contribuir a la caracterización del perfil longitudinal de la lámina libre en resaltos hidráulicos que tienen lugar en un cuenco amortiguador. Para ello, se desarrolla un modelo físico de cuenco amortiguador tipificado del United States Bureau of Reclamation (USBR II), sobre el cual se mide la superficie libre de un resalto con números de Froude y Reynolds $Fr_1=9$ y $Re_1=14.7 \cdot 10^4$, empleando técnicas LIDAR (*Light Detection And Ranging*). Junto con el perfil de la lámina libre se obtienen una serie de parámetros relacionados con el mismo y de relevancia para el funcionamiento del cuenco amortiguador. Los resultados obtenidos y su comparación con datos y expresiones procedentes de la bibliografía muestran que las técnicas empleadas son capaces de caracterizar de forma adecuada la superficie libre del resalto, lo cual resulta indicativo del potencial de esta novedosa instrumentación. Los resultados también apuntan a la capacidad del cuenco analizado para reducir las dimensiones del resalto manteniendo su capacidad disipadora de energía.

Palabras clave | perfil lámina libre; USBR II; modelo físico; cámara de tiempo de vuelo.

ABSTRACT

The present research seeks contributing to the hydraulic jump free surface longitudinal profile characterization in stilling basins. To do so, a typified stilling basin from the United States Bureau of Reclamation (USBR II) physical model was developed, in order to measure the free surface of a hydraulic jump with Froude and Reynolds number values of $Fr_1=9$ and $Re_1=14.7 \cdot 10^4$, using LIDAR (Light Detection And Ranging) techniques. Along with the jump profile, a series of related parameters with relevance in the performance of the basin were also obtained. The results and its comparison with bibliographic data and expressions showed that the employed techniques are able to achieve a proper characterization of the hydraulic jump free surface, which points out to the potential of the instrumentation. The results also support the performance of the analyzed basin and its utility to reduce de hydraulic jump dimensions and still ensure the energy dissipation capacity.

Key words | free surface profile; USBR II; physical model; time-of-flight camera.

INTRODUCCIÓN

El papel de los cuencos amortiguadores resulta clave en el proceso de adaptación de grandes presas a caudales superiores a los considerados en su diseño, ya que se trata de una de las partes de la presa cuyo diseño plantea un mayor reto (Fernández-Bono y Vallés-Morán, 2006), entre otros factores, por la complejidad del resalto hidráulico, fenómeno que se desarrolla en estas estructuras de disipación de energía (Macián-Pérez *et al.*, 2020a). Esta necesidad de adaptación viene propiciada por el cambio climático, los nuevos marcos legislativos y las crecientes exigencias de la sociedad en materia de seguridad frente a inundaciones (Carrillo *et al.*, 2020). Los cuencos amortiguadores suelen incorporar una serie de elementos disipadores de energía para optimizar su función y que, generalmente, influyen en las características del resalto hidráulico contenido en el cuenco. Así pues, resulta de gran interés conocer con precisión las características de estos resaltos hidráulicos en cuanto a su forma y longitud en función de la configuración y dimensiones del cuenco y la distribución en el mismo de los elementos disipadores de energía. El conocimiento de cómo estos factores influyen en las características del resalto es de gran utilidad para la adaptación y optimización de los cuencos amortiguadores, poniendo el foco en lograr reducir sus dimensiones sin menoscabar la función disipadora de energía de la estructura (Macián-Pérez *et al.*, 2021).

En cuanto al resalto hidráulico como fenómeno mediante el cual se produce la disipación de energía en los cuencos amortiguadores, cabe recalcar la complejidad del mismo. Se trata de un fenómeno marcadamente turbulento en el que se produce una intensa entrada de aire y grandes fluctuaciones de presión y velocidad (Bayón *et al.*, 2016). A pesar de que el tema del resalto hidráulico ha sido ampliamente tratado, su interés en el campo de la ingeniería hidráulica, así como su complejidad mantienen el foco sobre el estudio de sus distintas formas y características (Valero *et al.*, 2019; Viti *et al.*, 2019). Los primeros trabajos sobre el resalto hidráulico están constituidos por estudios experimentales que giran en torno a dimensiones básicas del mismo, como puede ser el perfil de la lámina libre, el ratio de calados conjugados o la longitud (Bélanger, 1841; Bakhmeteff y Matzke, 1935). Más adelante, comenzaron a aparecer estudios centrados en rasgos más complejos como el proceso de aireación o la caracterización del campo de velocidades y presiones (Toso y Bowers, 1988; Mossa, 1999; Murzyn *et al.*, 2005). Durante las últimas décadas estos estudios experimentales se han visto complementados por la aparición de modelos numéricos capaces de reproducir el fenómeno del resalto hidráulico y proporcionar información acerca de sus características (Bayón *et al.*, 2016; Macián-Pérez *et al.*, 2020a; De Padova *et al.*, 2023). No obstante, cabe señalar que estos modelos todavía presentan ciertas limitaciones para reproducir con total precisión flujos complejos, con gran presencia de turbulencia y aireación (Blocken y Gualtieri, 2012; Valero *et al.*, 2019).

Así pues, a pesar de los avances en materia de computación y las ventajas que pueden ofrecer los modelos numéricos aplicados al estudio del resalto hidráulico, las técnicas experimentales siguen vigentes y su uso es necesario tanto por sí mismo, como sirviendo de complemento para la calibración y validación de los mencionados modelos numéricos (Valero *et al.*, 2019). En este sentido, cabe destacar la aparición de nuevas técnicas e instrumentación experimental que permiten abordar características del resalto hidráulico tradicionalmente estudiadas, pero desde una nueva perspectiva. Dentro de estas técnicas pueden mencionarse los sistemas de velocimetría de imagen de partículas (PIV) para caracterizar el campo de velocidades (Adrian y Westerweel, 2011), el tratamiento digital de imágenes mediante grabación para el perfil de la lámina libre (Bayón *et al.*, 2016) o la utilización de sondas de conductividad cada vez más sofisticadas para el estudio de la aireación (Murzyn y Chanson, 2009), entre otras. Resulta interesante explorar estos nuevos enfoques y comprobar si son capaces de sobreponerse a ciertas dificultades inherentes a la metodología tradicional, optimizar la realización de las campañas experimentales o mejorar la calidad de los datos obtenidos.

De esta manera, la presente investigación plantea el estudio de la superficie libre del resalto hidráulico desarrollado en un modelo físico de cuenco amortiguador tipificado, empleando para ello técnicas LIDAR (*LIght Detection And Ranging*). La aplicación de esta tecnología a problemas del ámbito de la ingeniería hidráulica resulta bastante reciente y novedosa. Entre las primeras aplicaciones de estas técnicas a flujos con interés ingenieril puede destacarse el trabajo experimental de Blenkinsopp *et al.* (2012), estudiando las variaciones del perfil de la lámina libre en un canal de oleaje.

En el ámbito del resalto hidráulico, Montano *et al.* (2018) realizaron una serie de experimentos usando tecnología LIDAR para caracterizar la superficie libre del resalto hidráulico, atendiendo al perfil medio, sus oscilaciones y frecuencias características, así como al efecto de las fluctuaciones del pie del resalto sobre las propiedades de la superficie libre. En su trabajo, estos autores también hacen referencia a la precisión de las mediciones realizadas en función del posicionamiento de la instrumentación. Más adelante, Montano y Felder (2020) utilizaron de nuevo esta tecnología para tratar de relacionar los movimientos del pie del resalto

hidráulico y las fluctuaciones de su superficie libre, prestando especial atención a las escalas temporales y espaciales. Este mismo equipo también contrastó el uso del LIDAR con los resultados obtenidos con instrumentación puntual y de carácter intrusivo (Li *et al.*, 2021), poniendo el foco sobre el calado aireado. Más allá de las contribuciones de estos autores, no se cuenta con una amplia experiencia en el uso del LIDAR para realizar mediciones sobre la superficie libre del resalto hidráulico. De este modo, el presente estudio busca contribuir a la exploración del uso de esta nueva tecnología y su aplicación al ámbito de la ingeniería e hidráulica de presas.

El resalto hidráulico seleccionado como objeto de estudio reúne una serie de condiciones a fin de poder extrapolar los resultados obtenidos para su aplicación al diseño de cuencos amortiguadores. Estos resultados se compararon con información bibliográfica procedente de la aplicación de metodologías más tradicionales para evaluar el potencial de la tecnología LIDAR frente a otras técnicas experimentales.

MATERIAL Y MÉTODOS

La elección del caso de estudio se realizó priorizando la potencial aplicación de los resultados obtenidos al diseño de cuencos amortiguadores en presas. Por un lado, se desarrolló un modelo físico a escala reducida (MFR) de un cuenco tipificado número II del United States Bureau of Reclamation (USBR II). Este modelo de cuenco constituye un caso representativo ya que está ampliamente extendido y su diseño ha sido objeto de diversos estudios en los que su utilidad y ventajas frente a otros tipos de cuenco han quedado constatadas (Padulano *et al.*, 2017; Tajabadi *et al.*, 2017; Macián-Pérez *et al.*, 2020b).

Por otro lado, el resalto hidráulico desarrollado en el modelo cumple una serie de características (Tabla 1), no solo para favorecer la aplicación de los resultados obtenidos, sino también para minimizar la posible aparición de efectos de escala.

Tabla 1 | Características del resalto hidráulico objeto de estudio.

Calado supercrítico (y_1)	Ancho del resalto (b)	Caudal (Q)	Longitud zona recirculación (L_r)	Número de Froude (Fr_1)	Número de Reynolds (Re_1)
0.03 m	0.77 m	0.113 m ³ /s	1.25 m	9.0	14.7·10 ⁴

En primer lugar, el número de Froude (Fr_1) tiene un valor de 9.0, lo cual proporciona unas condiciones óptimas para lograr una disipación de energía adecuada en el cuenco, de acuerdo con la USBR (Peterka, 1978). En cuanto al número de Reynolds (Re_1), un alto valor de este parámetro adimensional asegura una adecuada extrapolación de los resultados obtenidos en el modelo físico reducido a la realidad (escala de prototipo). El valor de Re_1 en el resalto hidráulico estudiado alcanza los 14.7·10⁴. Por último, la relación entre el calado supercrítico (y_1) y el ancho del resalto estudiado (b) toma un valor de 0.039. A continuación se muestra una tabla con los valores recomendados para evitar la aparición de efectos de escala significativos en modelos físicos reducidos de resalto hidráulico (Heller, 2011):

Tabla 2 | Recomendaciones para evitar la aparición de efectos de escala significativos (Heller, 2011).

Modelo desarrollado	Fenómeno afectado	Caudal
Resalto hidráulico	Ratio de calados conjugados	$Re_1 > 1 \cdot 10^5$ para $Fr_1 < 10$ y $y_1/b < 0.1$
Resalto hidráulico	Distribución de la fracción de vacío	$Re_1 > 1 \cdot 10^5$

Como puede observarse en la Tabla 2, el resalto hidráulico objeto de estudio cumple con las recomendaciones para minimizar la posible aparición de efectos de escala en el modelo. En cualquier caso, cabe recalcar que el cumplimiento de estos criterios no exime de forma definitiva de la aparición de efectos de escala, que siempre deben tenerse presentes al realizar modelos experimentales de flujos con la complejidad del que aquí se analiza. En este sentido, existen también otros criterios, distintos al presentado (Heller, 2011), con sus respectivas recomendaciones para paliar los efectos de escala al modelar resaltos hidráulicos (Murzyn y Chanson, 2008; Pfister y Chanson, 2014; Wang y Chanson, 2016).

El modelo físico reducido (Figuras 1 y 2) fue desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica y Obras Hidráulicas del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València (UPV). El modelo está conformado por un canal horizontal de flujo en lámina libre y sección rectangular. Las dimensiones del modelo son de 8.00 m de largo, 0.77 m de ancho y 0.64 m de alto. La solera del canal es de cristal y los cajeros de metacrilato. El canal consta de una compuerta aguas abajo para controlar los calados y ayudar a situar el resalto hidráulico en la posición deseada. Por otro lado, la entrada al modelo está conectada a otro canal de sección rectangular, que forma un ángulo de 53.80° con el canal horizontal, para simular la rápida del aliviadero aguas arriba de la entrada al cuenco. El sistema de bombeo está conectado al dispositivo experimental a través de una transición, al final de la impulsión, para pasar de flujo en presión a flujo en lámina libre justo a la entrada del canal que hace las veces de rápida de aliviadero. El sistema de bombeo es capaz de alcanzar caudales de hasta 130 l/s, lo cual asegura la consecución de las condiciones necesarias para desarrollar el experimento diseñado. El control del caudal se realiza por medio de un caudalímetro SIEMENS® (SITRANS MAG 5100W) conectado electrónicamente a una centralita de regulación, capaz de medir caudales entre 1 y 2500 m³/h con una incertidumbre inferior al 0.1%.

Por lo que respecta a los elementos de disipación de energía propios del cuenco tipificado USBR II, éstos se construyeron empleando un dispositivo de impresión 3D (Prusa MK3 3D printer de Pursa Research®). El material con el que se fabricaron estas piezas es un termoplástico conocido como ácido poliláctico (PLA), derivado de recursos renovables como pueden ser el almidón de maíz, yuca, o caña de azúcar. En cuanto al tamaño y distribución de estos elementos disipadores de energía en el seno del cuenco amortiguador, se siguieron las normas de diseño propuestas por la USBR (Peterka, 1978).

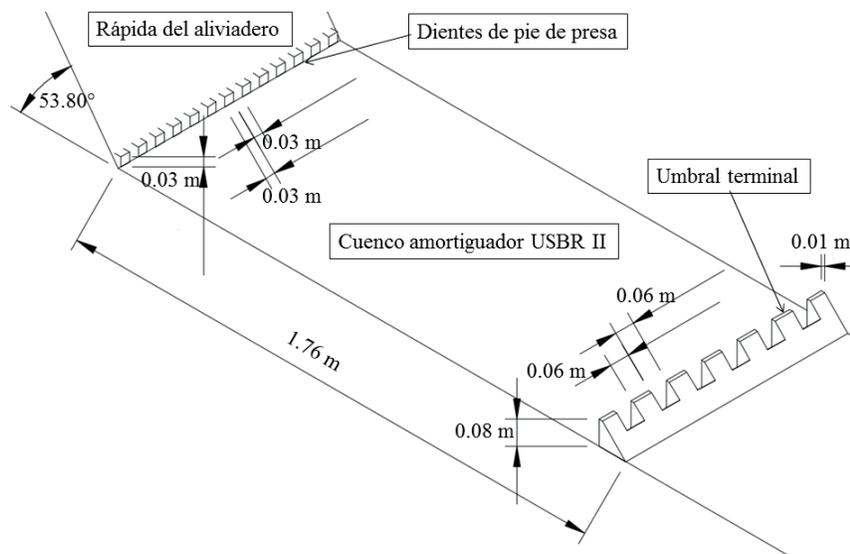


Figura 1 | MFR. Características y dimensiones del cuenco tipificado ensayado (Macián-Pérez *et al.*, 2020b).

En concreto, sobre el modelo desarrollado, se obtuvo el perfil longitudinal de la lámina libre del resalto hidráulico utilizando una cámara de tiempo de vuelo (Pico Monstar PMD®) basada en tecnología LIDAR (Figura 3). Esta cámara proporciona una nube de puntos para cada fotograma en base al tiempo de viaje del pulso emitido por la cámara, que se refleja en la superficie aireada del resalto. Precisamente, los resultados muestran que el carácter marcadamente bifásico del resalto hidráulico, con su superficie libre notablemente aireada, puede favorecer el uso de técnicas LIDAR ya que contribuye a la transmisión de la señal (Montano *et al.*, 2018). El conjunto de nubes de puntos obtenidas durante la medición se emplearon para representar el perfil longitudinal del resalto mediante el filtrado y promediado de los puntos de interés.

La cámara de tiempo de vuelo empleada alcanza una frecuencia de muestreo de 60 Hz (imágenes por segundo), con hasta $1 \cdot 10^5$ puntos medidos por imagen. El rango de distancias que cubre el dispositivo va de los 0.5 a los 6.0 m. La cámara se sitúa sobre el modelo, centrada en el eje longitudinal del canal, y aguas abajo del umbral terminal del cuenco amortiguador, de modo que enfoque y cubra la totalidad de la zona de estudio.



Figura 2 | MFR del cuenco tipificado USBR II en el Laboratorio de Hidráulica y Obras Hidráulicas de la UPV.

Antes de iniciar el experimento, se realizaron verificaciones a las especificaciones técnicas del escáner LIDAR, proporcionadas por el fabricante, empleando geometrías de referencia conocidas para evaluar el desempeño del equipo. Se observó que la precisión en las mediciones mostraba variaciones leves, influenciadas por las condiciones de iluminación ambiental y la reflectividad del objeto bajo análisis. Sin embargo, estas variaciones se mantuvieron dentro del margen de error especificado por el fabricante, que es de $\leq 1\%$ de la distancia medida.

Para el experimento, el LIDAR se configuró de tal manera que la distancia más corta a la zona de interés era de 1.5 m, mientras que la más larga era de 3.0 m. Dado que el sensor tiene una resolución de 352×287 píxeles y un ángulo de visión de 100° (horizontal) $\times 85^\circ$ (vertical), se estimó una densidad de puntos aproximada de 80 000 puntos por metro cuadrado en la zona más cercana y de 20 000 puntos por metro cuadrado en la más alejada. Este arreglo permitió asegurar una cobertura y resolución adecuadas para el análisis detallado del resalto hidráulico en el experimento.



Figura 3 | Cámara de tiempo de vuelo instalada en el canal para la toma de datos.

El procedimiento empleado para la obtención del perfil de la lámina libre utilizando la cámara de tiempo de vuelo se describe a continuación y puede también encontrarse de forma detallada en trabajos previos realizados por los autores (Macián-Pérez *et al.*, 2020b). En primer lugar, se coloca la cámara en posición para realizar una reconstrucción del canal experimental vacío, que sirva como referencia base para las nubes de puntos. A continuación, con el sistema iniciado y estabilizado, se realiza un escaneado de duración un minuto, lo cual proporciona más de 200 imágenes, con las que se busca asegurar que se obtiene información suficiente en todos los puntos del canal. Después, las nubes de puntos captadas en cada imagen se unifican en una sola que pasa a representar todas las mediciones tomadas.

En este estudio particular, se enfocó en el análisis del perfil longitudinal de la lámina libre. Para garantizar la precisión de los datos, se implementó un proceso de filtrado específico destinado a eliminar anomalías. Estas anomalías podrían provenir de interferencias relacionadas con la estructura física del canal o de las salpicaduras generadas por el resalto hidráulico, que la cámara podría captar inadvertidamente.

A partir de la nube de puntos generada, que representa el conjunto de todas las mediciones, se seleccionaron exclusivamente aquellos puntos cercanos al eje longitudinal del canal. Estos fueron posteriormente procesados para conformar un perfil bidimensional (2D). Con el objetivo de analizar los datos con mayor detalle, el perfil 2D se dividió en secciones de 5 cm. Esta segmentación permitió evaluar el promedio de las mediciones en cada sección de manera más eficiente y precisa.

En cada sección, los puntos se agruparon en una línea vertical única, situada en el centro de la sección, para representar la distribución vertical de los puntos. De esta distribución, se eliminó el 10% de los datos que se clasificaron como *outliers*, con el fin de descartar posibles anomalías en el proceso de medición. Posteriormente, se calculó el promedio de la distribución vertical de los puntos restantes para obtener un valor representativo para cada sección de 5 centímetros.

Es importante destacar que ciertas estructuras dentro del canal provocaron ocultamientos en la visión del LIDAR. Esto resultó en la generación de dos artefactos notables en el perfil al promediar los puntos. Este factor debe ser considerado al interpretar los resultados finales del estudio y así se comenta en el apartado correspondiente de Resultados y Discusión.

Por tanto, el procedimiento de obtención del perfil es el siguiente: en primer lugar se eliminan los extremos de la adquisición, correspondientes a los puntos afectados por el contacto con los cajeros del canal que compone el modelo. Después se colapsan todos los puntos del espacio 3D sobre un plano 2D, coincidente con el eje longitudinal del canal. A continuación se eliminan los puntos considerados como *outliers* por estar significativamente alejados de la media. Por último, se realiza un promedio cada pocos centímetros para generar el perfil.

Del mismo modo, cabe remarcar la importancia del posicionamiento de la cámara. Como puede observarse en la Figura 4, la distancia entre la cámara y la superficie libre afecta a los resultados. Así pues, hay una mayor densidad de medidas para posiciones más cercanas al instrumento, de manera que la zona más lejana debe ser cuidadosamente considerada para lograr una cantidad de puntos suficiente como para asegurar una representación adecuada de la superficie libre. En este sentido, las más de 200 nubes de puntos registradas lograron proporcionar un volumen de puntos suficiente como para garantizar la cobertura de las zonas más alejadas al posicionamiento de la cámara.

En cuanto a la realización de los ensayos, para asegurar condiciones similares durante toda la campaña, se fijaron y controlaron una serie de parámetros como el nivel del tanque de agua que alimenta el dispositivo experimental o la velocidad de rotación de la bomba. El objetivo era lograr un caudal y condiciones de contorno constantes, para dotar al experimento de rigor y garantizar su repetibilidad.

A pesar de ello, no hay que perder de vista la complejidad del fenómeno estudiado. De acuerdo con Wang (2014), las mediciones experimentales sobre resaltos hidráulicos se ven inevitablemente influenciadas por la naturaleza turbulenta y aireada del propio fenómeno. En este sentido, las características medibles del resalto pueden verse afectadas por el uso de instrumentación de carácter intrusivo, mientras que, por otro lado, la intensa aireación existente puede perjudicar el uso de técnicas no intrusivas. Además de esto, no puede perderse de vista la incertidumbre en la recolección de datos derivada de las limitaciones relativas al tiempo empleado en cada medición y a la frecuencia de adquisición de datos (Valero *et al.*, 2019). De este modo, existe siempre cierto grado de incertidumbre asociado a cualquier medición realizada sobre un fenómeno tan complejo como lo es el resalto hidráulico.

No obstante, y como se ha comentado, a fin de minimizar la mencionada incertidumbre, la localización de los instrumentos así como los tiempos de medida y frecuencia de adquisición fueron minuciosamente seleccionados.

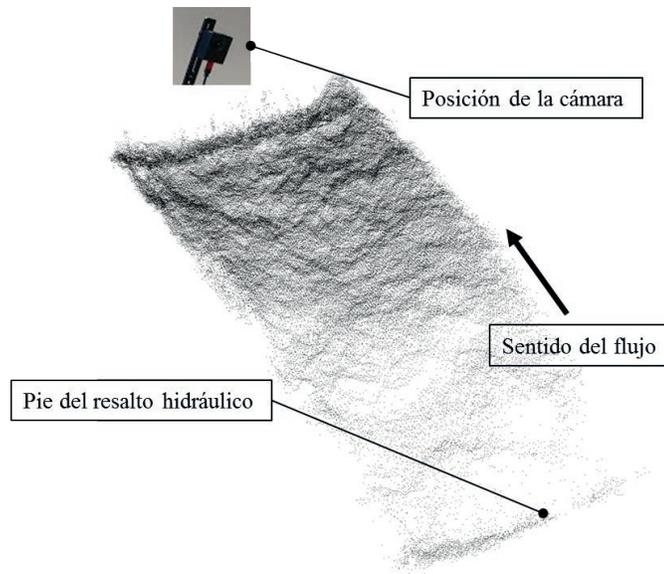


Figura 4 | Ejemplo de nube de puntos obtenida de la superficie del resalto hidráulico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Perfil de la lámina libre

Para la obtención del perfil de la lámina libre del resalto hidráulico, el primer paso consistió en el procesado de los datos obtenidos mediante el uso de las técnicas LIDAR. Para ello, los datos anómalos y valores atípicos causados por gotas de agua y salpicaduras fueron descartados. Este filtrado, junto con el procedimiento explicado en el apartado anterior, permitió la obtención de una serie de bandas que contienen un porcentaje determinado de los puntos del perfil longitudinal de la lámina libre medidos por la cámara de tiempo de vuelo durante la ventana de adquisición de datos. A modo de ejemplo, la Figura 5 muestra las bandas que contienen el 80% y el 90% de los puntos del perfil medidos experimentalmente.

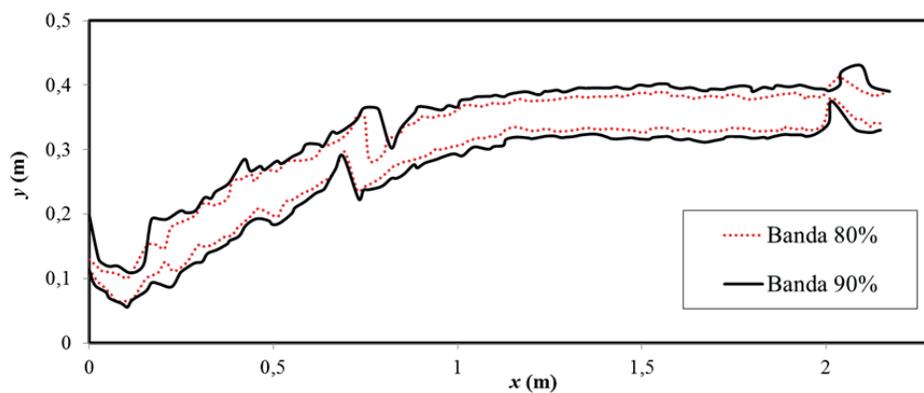


Figura 5 | Bandas que contienen el 80% y el 90% de los puntos del perfil de la lámina libre medidos por la cámara de tiempo de vuelo.

La amplitud de las bandas observadas en la Figura 5 (diferencia entre límite inferior y superior) es una muestra del carácter turbulento del resalto hidráulico, en el que se dan oscilaciones continuas de la superficie libre, con una entidad importante. Por otro lado, aunque obviamente la banda que contiene el 80% de las mediciones es más estrecha que la que contiene el 90%, es importante destacar la similitud entre ambas. Este hecho es indicativo de la consistencia de los resultados obtenidos mediante el uso de técnicas LIDAR y refuerza su aplicación para la medición de la superficie libre en resaltos hidráulicos, ya que esta instrumentación parece capaz de captar las oscilaciones de la misma pero sin una dispersión en los datos adquiridos que cuestione la fiabilidad de los resultados.

No obstante, y de cara a la obtención de un perfil longitudinal medio de la lámina libre en el resalto hidráulico estudiado, la Figura 5 muestra que es necesario cierto filtrado adicional para compensar algunos defectos derivados de las propias características del canal de ensayo. Por un lado puede observarse que, para los valores de x más bajos (en el entorno del pie del resalto hidráulico al inicio del cuenco amortiguador), la cámara de tiempo de vuelo ha escaneado parte del perfil de la superficie libre que todavía se encuentra en la rápida del aliviadero. Por ello, hay un pequeño descenso inicial de los valores de calado (y) que no es propio del resalto hidráulico. En consecuencia, esta parte del perfil ha de ser descartada ya que corresponde a la zona previa al comienzo del resalto hidráulico. Por otro lado, se pudo comprobar que las anomalías en el calado para valores de x de 0.7 y 2.1 aproximadamente, corresponden a la interferencia de la estructura del canal. En estas posiciones se sitúan sendas barras transversales de metacrilato para rigidizar en coronación los cajeros del canal que, inevitablemente, se interponen entre el resalto y la cámara. Los valores del perfil longitudinal de la lámina libre en estas posiciones fueron sustituidos por mediciones manuales realizadas con limnómetro.

Con todo ello, finalmente pudo obtenerse el perfil longitudinal medio de la lámina libre en el resalto hidráulico estudiado. Con la finalidad de comparar los resultados obtenidos en el presente estudio con información procedente de la bibliografía, el perfil se presenta de forma adimensionalizada, empleando las siguientes variables:

$$X = \frac{x-x_0}{L_r} \quad (1)$$

$$Y = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} \quad (2)$$

donde x_0 es la posición del pie del resalto hidráulico, mientras que L_r hace referencia a la longitud de la zona de recirculación en el resalto. El parámetro L_r se estimó por medio del criterio del punto de parada o estancamiento. Para ello se midieron una serie de perfiles verticales de velocidad en los cuales se identificó el punto en el que la velocidad se anula (punto de parada), empleando un dispositivo Pitot. La unión de todos estos puntos de parada permite limitar la zona de recirculación.

Por su parte, y_1 y y_2 representan de forma respectiva los calados supercrítico y subcrítico aguas arriba y aguas abajo del resalto hidráulico (calados conjugados). En la Figura 6 se compara el perfil obtenido con LIDAR en el presente estudio, para el resalto hidráulico ($Fr_1=9.0$) en cuenco USBR II, con los perfiles obtenidos por los autores en estudios previos, también relativos

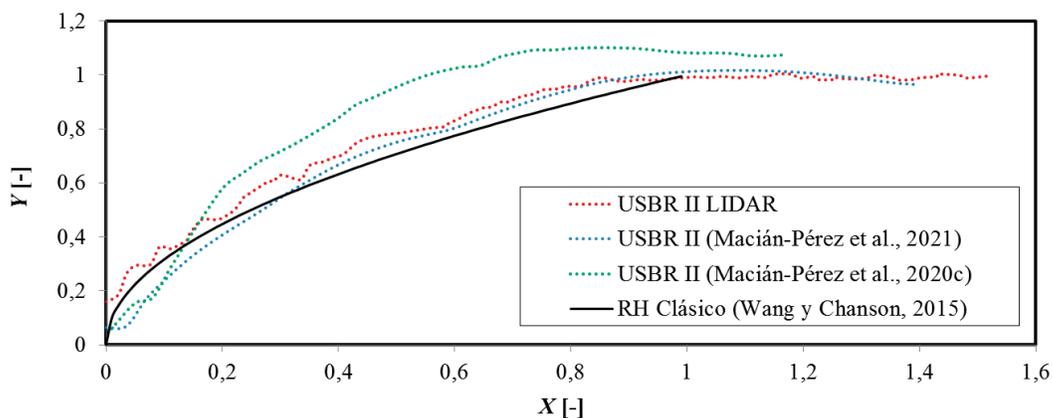


Figura 6 | Perfil longitudinal medio de la lámina libre en el resalto hidráulico estudiado ($Fr_1=9.0$) y comparación con resultados procedentes de la bibliografía.

a resaltos en este cuenco tipificado (Macián-Pérez *et al.*, 2020c; Macián-Pérez *et al.*, 2021). Además, se añade a la comparación el perfil obtenido con la expresión deducida por Wang y Chanson (2015) para resaltos hidráulicos clásicos (RH Clásico), es decir, aquellos resaltos que tienen lugar en un canal prismático, de pendiente horizontal, sección rectangular y que no presenta elementos disipadores de energía adicionales, a diferencia del cuenco amortiguador estudiado (USBR II).

Una observación general de la Figura 6 muestra la capacidad de la cámara de tiempo de vuelo para captar la superficie del resalto hidráulico objeto de estudio, ya que el perfil obtenido con esta técnica se sitúa entre los perfiles encontrados en la bibliografía y se ajusta a la tendencia que estos muestran. Más concretamente, el perfil obtenido con técnicas LIDAR muestra un gran ajuste con el perfil resultante de simular un cuenco amortiguador USBR II empleando un modelo numérico de dinámica de fluidos computacional (Macián-Pérez *et al.*, 2021). El coeficiente de determinación R^2 arroja un valor para estos dos perfiles de 0.996.

Por lo que respecta a la comparación con el perfil obtenido para un modelo físico de cuenco USBR II empleando técnicas distintas a la tecnología LIDAR (Macián-Pérez *et al.*, 2020c), las diferencias observadas son mayores. El perfil bibliográfico, en cuya obtención se emplearon técnicas de procesamiento digital de la imagen, parece sobreestimar durante un buen tramo los valores de calado obtenidos, tanto en el presente estudio, como en el modelo numérico previamente mencionado (Macián-Pérez *et al.*, 2021). La explicación a estas diferencias puede encontrarse en la propia aplicación de las técnicas de procesamiento digital de la imagen. Tal y como se describe en el estudio (Macián-Pérez *et al.*, 2020c), el tratamiento de imagen aplicado consiste en detectar la superficie libre en base a un umbral de intensidad de luz que permite identificar la interfaz aire-agua al examinar los píxeles de una grabación. Por un lado, la intensa turbulencia del fenómeno estudiado propicia múltiples salpicaduras que quedan registradas en la grabación y pueden afectar a la aplicación del método. Por otro lado, el propio procedimiento de grabación, con la cámara situada en un lateral del canal de ensayo hace que el perfil longitudinal medido no sea el coincidente con el eje del resalto hidráulico, a diferencia de lo que ocurre con el modelo numérico o las técnicas LIDAR. Así pues, estos dos factores deben tenerse en cuenta al considerar las diferencias observadas en la Figura 6. En cualquier caso, la tendencia de estos dos perfiles experimentales se asemeja bastante y dan lugar a un coeficiente R^2 de 0.963.

Finalmente, las ligeras diferencias observadas para el perfil obtenido con la expresión propuesta por Wang y Chanson (2015) provienen principalmente del tipo de resalto analizado. El perfil de Wang y Chanson (2015), presenta valores distintos de calado, generalmente por debajo de los del resto de perfiles, debido a la ausencia de los elementos disipadores de energía que sí están presentes en el resto de perfiles de la Figura 6. Asimismo, se observa que los perfiles en cuenco amortiguador parecen terminar su crecimiento (aumento en valores de calado) para valores de X en torno a 0.9, mientras que el perfil del RH Clásico continúa su crecimiento para valores de X superiores a 1.0. Estos resultados indican que en el cuenco USBR II se alcanza el calado subcrítico antes que en el RH Clásico, por lo que el resalto hidráulico que se desarrolla en estas estructuras de disipación de energía es más corto, tal y como apuntan estudios bibliográficos previos (Hager, 1992). El coeficiente de determinación R^2 entre el RH Clásico y el perfil obtenido con técnicas LIDAR es de 0.987.

Relación de calados conjugados

Además del propio estudio del perfil de la lámina libre, se analiza la relación de calados conjugados como parámetro directamente relacionado con el perfil y de relevancia para el diseño de cuencos amortiguadores. Este parámetro se define como el ratio entre el calado subcrítico aguas abajo del resalto hidráulico (y_2) y el supercrítico aguas arriba del mismo (y_1). De nuevo, el análisis se realiza a través de la comparación del valor obtenido en el presente estudio y otros valores bibliográficos. Así pues, junto al resultado obtenido con técnicas LIDAR se presentan los resultados para los modelos numérico (Macián-Pérez *et al.*, 2021) y experimental (Macián-Pérez *et al.*, 2020c) de cuenco USBR II presentados en el apartado anterior. Se incluyen también los resultados de la campaña experimental realizada por Padulano *et al.* (2017), para el cuenco USBR II. Asimismo, se introduce en la comparación una expresión teórica para RH Clásicos, basada en la ecuación de Bélanger (1841), pero que además incorpora el efecto de la fricción en las paredes laterales al resalto mediante la introducción de parámetros como el número de Reynolds (Re_1) o el ancho del canal (b) (Hager y Bremen, 1989):

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 Fr_1^2} - 1 \right) \left(1 - 0.7 \left[(\log Re_1)^{-2.5} \right]^{\frac{Fr_1}{8}} \right) \left(1 - \frac{3.25 y_1}{b Fr_1^{1/7}} [\log Re_1]^{-3} \right) \quad (3)$$

En la Tabla 3 se muestran los valores del ratio de calados conjugados para los distintos estudios:

Tabla 3 | Ratio de calados conjugados obtenido en el presente estudio y comparación con resultados bibliográficos.

Estudio	Fr_1	Relación de calados conjugados (y_2/y_1)
USBR II LIDAR	9.0	12.00
USBR II (Macián-Pérez <i>et al.</i> , 2021)	9.0	14.43
USBR II (Macián-Pérez <i>et al.</i> , 2020c)	5.0	6.07
USBR II (Padulano <i>et al.</i> , 2017)	~9.0	10.18
RH Clásico (Hager y Bremen, 1989)	9.0	12.17

Los resultados presentados muestran una variabilidad importante en los valores obtenidos para la relación de calados conjugados. Estas diferencias pueden tener su origen en varios factores. En primer lugar, a pesar de que el calado subcrítico (y_2) está claramente definido a nivel teórico, la identificación de este valor en un modelo de resalto hidráulico puede encontrar diversas complicaciones derivadas, no solo de las oscilaciones de la superficie libre que dificultan su medición directa, sino también del hecho de que en muchas ocasiones es difícil asegurar la localización de la sección en la que se produce e incluso una longitud de canal suficiente como para que el modelo de resalto alcance el valor definitivo de y_2 . Por otro lado, resulta complejo determinar el valor del calado supercrítico (y_1) en los modelos de cuenco amortiguador tipificado USBR II ya que en la zona de medición confluye el final de la rápida que conforma el aliviadero con los dientes situados al pie de la misma, propios del cuenco analizado. Estas dificultades en la medición de los calados pueden dotar de cierta incertidumbre a los resultados obtenidos para el ratio de calados conjugados.

En cualquier caso, puede afirmarse que el valor obtenido en el presente estudio se encuentra dentro del rango de los valores obtenidos en la bibliografía. En ciertos casos las discrepancias observadas pueden deberse no solo a las ya mencionadas dificultades en la medición, sino también a las diferencias en una serie de parámetros del resalto como Fr_1 , Re_1 o b que, tal y como muestra la Ecuación (3), afectan a la relación de calados conjugados.

Eficiencia del resalto hidráulico

La eficiencia del resalto hidráulico (η) es un parámetro crucial en el diseño de cuencos amortiguadores ya que está relacionada con la pérdida de energía que se produce en el flujo a través del resalto y, por tanto, es un reflejo de la función principal que tienen estas estructuras disipadoras de energía. El valor de la eficiencia está estrechamente relacionado con las mediciones de calados, ya que puede calcularse a través de la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{H_{01} - H_{02}}{H_{01}} \quad (4)$$

donde H_{01} y H_{02} son respectivamente los valores de la energía específica aguas arriba (flujo supercrítico) y aguas abajo (flujo subcrítico) del resalto hidráulico. La Tabla 4 recoge el resultado de eficiencia obtenido en el presente estudio junto a una serie de valores bibliográficos.

Tabla 4 | Eficiencia del resalto hidráulico obtenida en el presente estudio y comparación con resultados bibliográficos.

Estudio	Fr_1	Eficiencia del resalto hidráulico (η)
USBR II LIDAR	9.0	0.705
USBR II (Macián-Pérez <i>et al.</i> , 2021)	9.0	0.648
USBR II (Macián-Pérez <i>et al.</i> , 2020c)	5.0	0.516
USBR II (Padulano <i>et al.</i> , 2017)	~9.0	0.700-0.750
RH Clásico (Hager y Bremen, 1989)	9.0	0.701

Los resultados presentan de nuevo cierta variabilidad, como no podía ser de otra forma, ya que la variabilidad en los calados conjugados, se traslada inevitablemente al cálculo de la eficiencia del resalto. De nuevo, los valores derivados de la utilización de técnicas LIDAR se encuentran en el rango de los resultados bibliográficos. Las discrepancias observadas en la Tabla 4 se explican por la combinación de una serie de factores ya mencionados en el apartado anterior, entre los que se encuentran la incertidumbre en las mediciones o las diferencias en los parámetros que definen al resalto hidráulico de un estudio a otro, en particular el Fr_1 .

CONCLUSIONES

La necesidad de adaptación de los cuencos amortiguadores en grandes presas, para lidiar con caudales superiores a aquellos para los que fueron diseñados, constituye un reto de gran importancia en el ámbito de la ingeniería hidráulica. Para abordar esta problemática resulta crucial profundizar en el estudio del resalto hidráulico, fenómeno mediante el cual se disipa la energía en estas estructuras. El objetivo principal consiste en optimizar el diseño de estos cuencos de modo que puedan reducir sus dimensiones o mantenerlas, pero recibiendo caudales superiores, por supuesto, sin comprometer su función disipadora de energía.

A tal fin, el presente estudio explora la utilización de nuevas técnicas experimentales para la medición de una serie de parámetros y variables que resultan clave para evaluar la potencial adaptación de los cuencos amortiguadores a la que se ha hecho referencia. En concreto, se desarrolló un modelo físico a escala reducida de cuenco amortiguador tipificado USBR II, sobre el cual se caracterizó el perfil longitudinal de la lámina libre del resalto hidráulico utilizando técnicas LIDAR. Además del propio perfil de la lámina libre, se estudiaron una serie de parámetros directamente relacionados con el comportamiento de estas estructuras disipadoras de energía como la relación de calados conjugados o la eficiencia del resalto hidráulico. Los valores obtenidos se compararon con datos de otros estudios similares y expresiones analíticas procedentes de la bibliografía.

Como principal resultado del presente estudio destaca el potencial observado para la cámara de tiempo de vuelo, basada en técnicas LIDAR, como instrumento con aplicación a problemas de ingeniería hidráulica. El perfil de la lámina libre obtenido con este instrumento representa fielmente la forma y calados que se encuentran en el resalto hidráulico desarrollado en este tipo de cuenco. Asimismo, la instrumentación empleada fue capaz de superar ciertas limitaciones presentadas por otras técnicas experimentales. Del mismo modo, las técnicas LIDAR mostraron su capacidad para proporcionar los valores de la relación de calados conjugados y la eficiencia del resalto de forma adecuada, aunque con cierto grado de incertidumbre en la obtención de los calados subcrítico y supercrítico, en cualquier caso, asimilable al del resto de técnicas experimentales.

Por lo que respecta a la potencial optimización de la disipación de energía en presas, el presente estudio apunta a que el cuenco objeto de estudio da lugar a resaltos hidráulicos más cortos, sin comprometer la eficiencia de los mismos en comparación, por ejemplo, con los resaltos hidráulicos clásicos. No obstante, es importante destacar que la campaña experimental desarrollada resulta limitada, en cuanto a variantes de resaltos estudiados y parámetros medidos. En este sentido, si bien el número de Froude empleado aquí responde a las recomendaciones del USBR (Peterka, 1978), sería particularmente interesante de cara a futuros desarrollos la experimentación con otros valores de este parámetro. Es por lo tanto necesario proseguir en esta línea de investigación para confirmar los resultados obtenidos e, incluso, acometer nuevas líneas en las que se estudien modificaciones en el diseño de los cuencos para profundizar en su potencial adaptación.

En definitiva, los resultados obtenidos arrojan luz sobre el uso de nuevas técnicas experimentales para el estudio de un fenómeno de la complejidad del resalto hidráulico. Estos resultados también contribuyen a la caracterización del resalto hidráulico desarrollado en un cuenco amortiguador tipificado USBR II y, a su vez, pueden emplearse para afrontar el reto de la adaptación de las estructuras de disipación de energía en grandes presas.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue financiada por las becas predoctorales de la Generalitat Valenciana ([2015/7521]), en colaboración con el Fondo Social Europeo y el proyecto de investigación: ‘La aireación del flujo y su implementación en prototipo

para la mejora de la disipación de energía de la lámina vertiente por resalto hidráulico en distintos tipos de presas' (BIA2017-85412-C2-1-R), financiado por el Ministerio de Economía.

Asimismo, los autores agradecen la colaboración del personal de la UPV, principalmente los técnicos del Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.

REFERENCIAS

- Adrian, R. J., Westerweel, J. 2011. *Particle image velocimetry* (No. 30). Cambridge university press, Cambridge, UK.
- Bakhmeteff, B.A., Matzke, A.E. 1936. The Hydraulic Jump In Terms of Dynamic Similarity. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 101(1), 630-647. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0004708>
- Bayón, A., Valero, D., García-Bartual, R., Vallés-Morán, F.J., López-Jiménez, P.A. 2016. Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environmental Modelling and Software*, 80, 322-335. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.018>
- Bélanger, J.B. 1841. *Notes sur l'Hydraulique*. Ecole Royale Des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- Blenkinsopp, C. E., Turner, I. L., Allis, M. J., Peirson, W. L., Garden, L. E. 2012. Application of LiDAR technology for measurement of time-varying free-surface profiles in a laboratory wave flume. *Coastal Engineering*, 68, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.04.006>
- Blocken, B., Gualtieri, C. 2012. Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics. *Environmental Modelling & Software*, 33, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.02.001>
- Carrillo, J.M., Castillo, L.G., Marco, F., García, J.T. 2020. Experimental and numerical analysis of two-phase flows in plunge pools. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(6), 04020044. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001763](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001763)
- De Padova, D., Mossa, M., Sibilla, S. 2023. SPH modelling of hydraulic jump at high Froude numbers at an abrupt drop: vorticity and turbulent pressure fluctuations. *Environmental Fluid Mechanics* 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10652-023-09922-4>
- Fernández-Bono, J.F., Vallés-Morán, F.J. 2006. Criterios metodológicos de adaptación del diseño de cuencos de disipación de energía a pie de presa con resalto hidráulico, a caudales superiores a los de diseño. *XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Ciudad Guayana, Venezuela.
- Hager, W.H., Bremen, R. 1989. Classical hydraulic jump: Sequent depths. *Journal of Hydraulic Research*, 27(5), 565-585. <https://doi.org/10.1080/00221688909499111>
- Hager, W.H. 1992. *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*. Springer Science & Business Media, Dordrecht, The Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-8048-9>
- Heller, V. 2011. Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), 293-306. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.578914>
- Li, R., Splinter, K. D., Felder, S. 2021. LIDAR scanning as an advanced technology in physical hydraulic modelling: The stilling basin example. *Remote Sensing*, 13(18), 3599. <https://doi.org/10.3390/rs13183599>
- Macián-Pérez, J.F., Bayón, A., García-Bartual, R., López-Jiménez, P.A., Vallés-Morán, F.J. 2020a. Characterization of Structural Properties in High Reynolds Hydraulic Jump Based on CFD and Physical Modeling Approaches. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(12), 04020079. <https://doi.org/10.3390/w12010227>
- Macián-Pérez, J.F., Vallés-Morán, F.J., Sánchez-Gómez, S., De-Rossi-Estrada, M., García-Bartual, R. 2020b. Experimental Characterization of the Hydraulic Jump Profile and Velocity Distribution in a Stilling Basin Physical Model. *Water*, 12(6), 1758. <https://doi.org/10.3390/w12061758>

- Macián-Pérez, J.F., García-Bartual, R., Huber, B., Bayón, A., Vallés-Morán, F.J. 2020c. Analysis of the flow in a typified USBR II stilling basin through a numerical and physical modeling approach. *Water*, 12(1), 227. <https://doi.org/10.3390/w12010227>
- Macián-Pérez, J.F., Vallés-Morán, F.J., García-Bartual, R. 2021. Assessment of the Performance of a Modified USBR Type II Stilling Basin by a Validated CFD Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(11), 1-12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001623](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001623)
- Montano, L., Li, R., Felder, S. 2018. Continuous measurements of time-varying free-surface profiles in aerated hydraulic jumps with a LIDAR. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 93, 379-397. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.01.016>
- Montano, L., Felder, S. 2020. LIDAR Observations of Free-Surface Time and Length Scales in Hydraulic Jumps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146 (4), 04020007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001706](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001706)
- Mossa, M. 1999. On the oscillating characteristics of hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, 37(4), 541-558. <https://doi.org/10.1080/00221686.1999.9628267>
- Murzyn, F., Mouazé, D., Chaplin, J.R. 2005. Optical fibre probe measurements of bubbly flow in hydraulic jumps. *International Journal of Multiphase Flow*, 31(1), 141-154. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2004.09.004>
- Murzyn, F., Chanson, H. 2008. Experimental assessment of scale effects affecting two-phase flow properties in hydraulic jumps. *Experiments in Fluids*, 45, 513-521. <https://doi.org/10.1007/s00348-008-0494-4>
- Murzyn, F., Chanson, H. 2009. Two-phase flow measurements in turbulent hydraulic jumps. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(6), 789-797. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.12.003>
- Padulano, R., Fecarotta, O., Del Giudice, G., Carravetta, A. 2017. Hydraulic design of a USBR Type II stilling basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(5), 04017001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001150](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001150)
- Peterka, A. J. 1978. *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators* (No. 25). Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Washington D.C., USA.
- Pfister, M., Chanson, H. 2014. Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 26(2), 291-298. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(14\)60032-9](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(14)60032-9)
- Tajabadi, F., Jabbari, E., Sarkardeh, H. 2017. Hydrodynamic analysis of flow in USBR stilling basin types I, II, III. *Journal of Dam and Hydroelectric Powerplant*, 4(13), 43-54.
- Toso, J.W., Bowers, C.E. 1988. Extreme pressures in hydraulic-jump stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8), 829-843. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:8\(829\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:8(829))
- Valero, D., Viti, N., Gualtieri, C. 2019. Numerical Simulation of Hydraulic Jumps. Part 1: Experimental Data for Modelling Performance Assessment. *Water*, 11(1), 36. <https://doi.org/10.3390/w11010036>
- Viti, N., Valero, D., Gualtieri, C. 2019. Numerical Simulation of Hydraulic Jumps. Part 2: Recent Results and Future Outlook. *Water*, 11(1), 28. <https://doi.org/10.3390/w11010028>
- Wang, H. 2014. *Turbulence and Air Entrainment in Hydraulic Jumps*. Ph. D. Thesis, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Wang, H., Chanson, H. 2015. Experimental study of turbulent fluctuations in hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(7), 04015010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001010](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001010)
- Wang, H., Chanson, H. 2016. Self-similarity and scale effects in physical modelling of hydraulic jump roller dynamics, air entrainment and turbulent scales. *Environmental Fluid Mechanics*, 16, 1087-1110. <https://doi.org/10.1007/s10652-016-9466-z>