
REVISTA
HIDROLATINOAMERICANA
DE
JÓVENES
INVESTIGADORES Y
PROFESIONALES

Volumen 4 – 2020
ISSN: 2520-2960



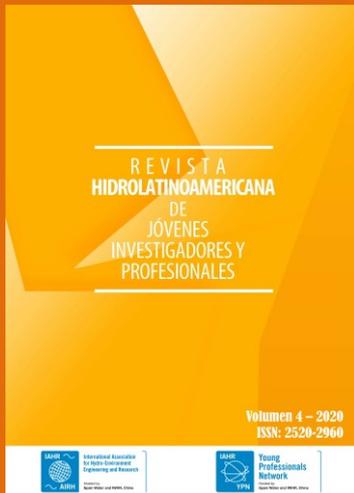
International Association
for Hydro-Environment
Engineering and Research

Hosted by
Spain Water and IWHR, China



Young
Professionals
Network

Hosted by
Spain Water and IWHR, China



Revista Hidrolatinoamericana
de Jóvenes Investigadores y
Profesionales

ISSN: 2520-2960 (digital)

Agosto de 2020

Director y Editor

José M. Carrillo

Editores Asociados

Boris José Lora-Ariza

Henry Fabrizzio Martínez Naranjo

María Gabriela Castrellón Romero

Gerles Ediver Medina Orellano

Yoch Ponte Torres

Karol Sánchez Luquez

Edita

International Association for
Hydro-Environment Engineering
and Research

iahr@iahr.org

www.iahr.org

Madrid Office:

Paseo Bajo Virgen del Puerto 3,

28005 Madrid, SPAIN

Tel. +34 91 335 7908

Beijing Office:

A-1 Fuxing Road, Haidian District,

100038 Beijing, CHINA Tel. +86 10

6878 1808

Supported by Spain Water and
IWHR, China

Sumario

- i Sobre la División Regional Latinoamericana (LAD-IAHR)
- ii Sobre la revista
- iii Comité Editorial
- 1 Flujo bifásico en cuencos de disipación de energía
Two-phase flow in energy plunge pools
(*Marco F.; Castillo L.G.; García J.T.*)
- 5 Análisis experimental de frecuencia de interferencia y fracciones de vacío en chorros turbulentos rectangulares
Experimental analysis of frequency of interference and void fractions in rectangular turbulent jets
(*Ortega P.R.; Castillo L.G.; García J.T.*)
- 9 Modificación de series históricas de precipitación con base en escenarios climáticos futuros. El caso de estudio de la cuenca del río Con (Galicia)
Perturbation of historic rainfall series based on future climate scenarios. A study case of the river Con basin (Galicia)
(*García-Alén, G.; Cea, L.; Bermúdez, M.*)
- 12 Análisis de un vertedero tipo laberinto con Iber
Analysis of a labyrinth weir with Iber
(*Ros-Casajús, M.; Viguera-Rodríguez, A.*)
- 16 Tratamiento de imágenes para la adquisición de perfiles de agua y sedimento en laboratorio
Image processing for water and sediment contours acquisition in the laboratory
(*Toapaxi, J.A.; Guillén, S.G.; Carrillo, J.M¹; Castillo, L.G.*)

Sobre la División Regional Latinoamericana (LAD-IAHR)

La Asociación Internacional de Ingeniería e Investigación Hidro-ambiental (IAHR), fundada en 1935, es una organización mundial e independiente, de ingenieros y científicos trabajando en el ámbito del AGUA -continental y marítima- y en el de su medio ambiente asociado. Las actividades van desde hidráulica fluvial y marítima a desarrollo de los recursos agua y eco-hidráulica, incluidas la ingeniería de hielo, hidroeinformática y maquinaria hidráulica.

Los objetivos de la División Latinoamericana son, con carácter general los de la IAHR y específicamente, promover, en Latinoamérica, la difusión del conocimiento, la investigación, el desarrollo y la innovación en el ámbito del agua y de su medio ambiente asociado, tanto en el dominio de las continentales como en el de las marítimas.

La IAHR apoya la educación y el desarrollo profesional de futuros ingenieros y científicos en la comunidad hidráulica. A través de las Redes de Jóvenes Profesionales (Young Professional Networks, YPN) de la IAHR, jóvenes profesionales y estudiantes se reúnen para compartir experiencias, desarrollar proyectos singulares y participar en las actividades de la IAHR como el congreso mundial bienal, aprovechando la oportunidad para aprender de otros miembros de la IAHR y crear una red útil para sus futuras carreras. Las actividades de los Jóvenes Profesionales incluyen:

- Seminarios de investigación, foros de discusión y talleres.
- Excursiones para visitar obras hidráulicas locales.
- Proyectos de investigación de grupo.
- Viajes de grupo a simposios, talleres y congresos de la IAHR.
- Colaboración informal con las Redes de Jóvenes Profesionales vecinas.
- Recaudación de fondos para la participación de los miembros en congresos de la IAHR y otros foros.
- Solicitud para albergar uno de los congresos/foros de la IAHR.
- Hermanamiento.

En la actualidad, la División Regional Latinoamericana (LAD-IAHR) cuenta con 18 grupos de Redes de Jóvenes Profesionales (YPN), con presencia en 8 países.



Sobre la revista

La Revista Hidrolatinoamericana de Jóvenes Investigadores y Profesionales es una revista de los Young Professional Networks de Latinoamérica.

Nace a partir del XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, celebrado en Lima (Perú) con el fin de fomentar la colaboración entre los grupos Latinoamericanos de Jóvenes Profesionales de la IAHR.

Sus objetivos son:

- Generar un entorno de comunicación entre socios YPN.
- Incrementar la visibilidad de los jóvenes dentro de la IAHR.
- Fomentar la participación de los jóvenes en congresos internacionales y publicaciones en revistas de prestigio internacional (RIBAGUA, JHR, JAWER, etc).

Pensamos que esta revista de frecuencia anual, y publicación libre de cobro por procesamiento de artículos, es una gran oportunidad para que los Jóvenes Investigadores y Profesionales puedan difundir sus actividades, aportando a la comunidad Latinoamericana de Hidráulica una panorámica de la investigación y los trabajos singulares que se realizan en sus distintas instituciones.

Las contribuciones originales e inéditas serán de carácter científico-técnico en uno de los ámbitos de la IAHR. Las contribuciones pueden ser científicas, técnicas o presentar una solución innovadora a un problema de ingeniería. Para su envío, deberán ser redactadas en español o portugués, con una longitud de 3 páginas.

Las instrucciones de estilo y formato pueden descargarse de la plantilla de Microsoft Word en el enlace situado en la página web propia de la revista (<https://www.revistahidrolatinoamericana.com/>). Asimismo, la página web de la revista facilita el acceso a todos sus contenidos.

Previo a su aceptación, el Comité Editorial someterá a todos los artículos a un proceso de detección de plagio. Si un artículo no cumple con los requisitos, puede ser rechazado o devuelto a los autores para que sea corregido. Una vez concluido este proceso pasa al proceso de revisión por pares.

Todas las contribuciones se someten a un proceso de revisión anónima por pares externos a la institución editora. El Comité Editorial velará para que no existan conflicto de intereses (relaciones financieras, institucionales, de colaboración, entre otras) entre los revisores anónimos y los autores. La revisión indicará si el artículo puede ser válido para su publicación.

Agradecemos el apoyo del Comité Científico que realiza un esfuerzo en dotar a esta publicación de calidad con el objetivo de dar prestigio a los trabajos, permitir la indexación de la publicación y alcanzar un elevado nivel de clasificación y de citas.

A fecha de publicación de este volumen, la revista se encuentra indizada en:



Comité Editorial

Editor: D. José M. Carrillo

Editores asociados (por grupos YPN)

IAHR Bogota Young Professionals Network
D. Boris José Lora-Ariza

**IAHR Universidad Nacional de Ingeniería-
GEAHH Young Professionals Network**
D. Gerles Ediver Medina Orellano

IAHR ESPOCH Young Professionals Network
D. Henry Fabrizzio Martínez Naranjo

**IAHR Universidad Nacional Mayor de San
Marcos Young Professionals Network**
D. Yoch Ponte Torres

IAHR Panamá Young Professionals Network
Dña. María Gabriela Castellón Romero

IAHR Venezuela Young Professionals Network
Dña. Karol Sánchez Luquez

Comité Científico Externo

Dña. Adriana Patricia Piña Fulano
Universidad Nacional de Colombia (Colombia)

D. Luis Fernando Silva Vargas
Universidad Nacional de Colombia (Colombia)

D. Arturo Marcano
Universidad Católica Andrés Bello (Venezuela)

D. Marco Antonio Ordoñez Viñan
*Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
(Ecuador)*

D. Christian Frias
Barr Engineering Co. (Estados Unidos de América)

Dña. María Gabriela Castellón Romero
Universidad del Istmo (Panamá)

D. Christopher Mendoza
Universidad Católica Andrés Bello (Venezuela)

Dña. Marisa Rosana Silva Davila
Universidad Nacional de Ingeniería (Perú)

D. Gonzalo Pulido Silva
Universidad del Istmo (Panamá)

D. Miguel Angel Zubiaur Alejos
Universidad Nacional de Ingeniería (Perú)

D. José M. Carrillo
Universidad Politécnica de Cartagena (España)

Dña. Veronica León
*École Nationale Supérieure de l'Energie,
l'Eau et l'Environnement (Francia)*

D. Kensuke Naito
Universidad de Ingeniería y Tecnología (Perú)

D. William Andrés Jaén Sánchez
Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador)

D. Lucas E. Calvo G.
*Centro de Investigaciones Hidráulicas e
Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá (Panamá)*

D. Yoch Ponte Torres
Pontificia Universidad Católica (Perú)

Revista Hidrolatinoamericana publica bajo la licencia



Flujo bifásico en cuencos de disipación de energía *Two-phase flow in energy plunge pools*

(Recepción 12/03/2020; Aceptación 24/04/2020)

Marco F.¹; Castillo L.G.¹; García J.T.¹

¹ Escuela de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas
Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)
Paseo Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena, España
Teléfono: 868071014
Email: francisca.marco@upct.es

Resumen. Este trabajo presenta un estudio experimental del análisis de un resalto hidráulico sumergido generado al pie de un aliviadero de vertido libre. El estudio se enfoca en el análisis de la fracción de vacío y la velocidad media cerca del fondo. Para ello, se han llevado a cabo mediciones del campo de velocidad y de la tasa de arrastre de aire de diferentes secciones a lo largo del resalto. En las mediciones se ha utilizado un equipo de fibra óptica de doble punta RBI-Instruments y un sistema de tubo de Pitot con back-flushing utilizando transductores de presión GE Druck modelo UNIK 5000.

Palabras clave. Cuenco de disipación; fibra óptica; flujo emulsionado; resalto hidráulico sumergido; tubo de Pitot con back-flushing.

Abstract. This paper presents an experimental study of the analysis of a submerged hydraulic jump generated downstream of a free spillway. The study focuses on the analysis of the void fraction and the mean velocity near the bottom. For this purpose, the velocity field and air entrainment rate were measured in different sections of the submerged hydraulic jump. An optical fiber equipment from RBI-Instruments and a back-flushing Pitot tube with pressure transducers GE Druck model UNIK 5000 were used.

Keywords. Air-water flow; back-flushing Pitot tube; fiber-optical; plunge pool; submerged hydraulic jump.

1. Introducción

En los últimos años, la mejora del conocimiento de las series temporales y la reciente modificación de las Normas Técnicas de Seguridad para las grandes presas y sus embalses (NTS), han aconsejado la reevaluación de la capacidad de descarga y de las condiciones de operación de presas en todo el mundo. Varios estudios (FEMA, 2014) han planteado que muchas de las presas existentes pueden tener una capacidad de descarga insuficiente, lo que aumenta la posibilidad de que existan desbordamientos durante eventos extremos. Pero aumentar la capacidad de los aliviaderos resulta costoso y en ocasiones técnicamente inviable. El sobrevvertido genera nuevas condiciones de cargas y pueden causar aguas abajo de la presa problemas de erosión y socavación (Wahl et al., 2008).

Un mejor conocimiento de los patrones de flujo en el cuenco de disipación es importante para los diseñadores y los proyectistas. Los efectos de la entrada de aire en el resalto hidráulico sumergido pueden ser esenciales de cara a la seguridad de operación de estructuras hidráulicas.

El resalto hidráulico es una transición súbita de un régimen en flujo supercrítico a subcrítico. Se caracteriza por el desarrollo de la turbulencia a gran escala, ondas superficiales, incorporación de aire y alta disipación de energía. La Fig. 1 muestra una

representación esquemática del resalto hidráulico sumergido en un cuenco de disipación.

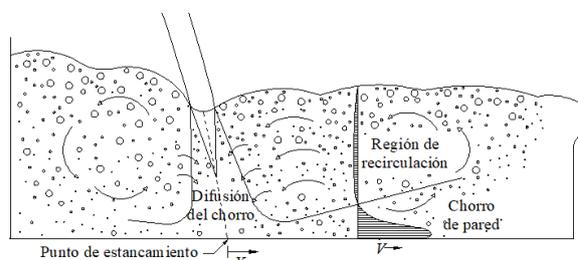


Figura 1. Resalto hidráulico sumergido en un cuenco de disipación (adaptado de Carrillo et al., 2020).

2. Material y métodos

2.1. Instalación experimental

La infraestructura utilizada se encuentra en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena. Permite estudiar la disipación de energía de resaltos hidráulicos sumergidos creados aguas abajo de un aliviadero de vertido libre. Dicha instalación permite medir caudales entre 10 y 200 l/s, registrar alturas de caída de 2.20 hasta 3.50 m, y disponer de colchones de agua que varían entre 0 m y 1 m de profundidad. En el resalto hidráulico sumergido que se forma aguas abajo del punto de impacto (Fig. 1), se han realizado

mediciones de la tasa de aireación y del campo de velocidades en diez secciones transversales aguas abajo del punto de estancamiento y equiespaciadas cada 0.10 m, con un equipo de fibra óptica y un sistema de tubo de Pitot con back-flushing.

Como continuación del artículo de Carrillo et al. (2020), se analiza un resalto hidráulico sumergido con un caudal específico $q = 0.099 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ y un calado al final del cuenco de disipación $Y = 0.30 \text{ m}$.

2.2. Fibra óptica

Para detectar el cambio de fase entre el agua y el aire (RBI-Instruments, 2012) se empleó un equipo de fibra óptica de RBI-Instruments, con la finalidad de obtener la fracción de vacío local. Esta sonda de doble punta detecta el ascenso y el descenso de la señal como el inicio y el fin del cambio de fase en la punta del sensor. Los valores establecidos para el umbral se fijaron en 0 V (agua) y 5 V (aire). Se definió la fracción de vacío como el cociente entre el tiempo total que la sonda se encuentra en aire (Σt_{Gi}) y el tiempo total t del experimento.

Una fuente de error en la estimación del aire atrapado en un flujo es debida al cálculo estadístico del número de burbujas de aire que entra en contacto con las puntas de la sonda (Stutz, 1996). Por lo tanto, es necesario contar con mediciones lo suficientemente largas para obtener resultados precisos.

Para estimar la duración mínima que la medición debe tener se siguieron las recomendaciones de André et al. (2005) y de Boes y Hager (2003), considerando así un tiempo de muestreo de 90 s.

2.3. Tubo de Pitot con Back-flushing

Se utilizó un tubo de Pitot con back-flushing para registrar los perfiles de velocidad en las mismas secciones donde se habían realizado las mediciones de fibra óptica. El tubo de Pitot mide la diferencia de presión entre la presión dinámica y la estática. Se utilizaron transductores de presión GE Druck modelo UNIK 5000 para registrar las variaciones de presión. Estos sensores tienen un rango de medición entre -200 y +800 mbar y una precisión de fondo de escala de $\pm 0.04\%$. La señal de salida de ambos puertos fue escaneada a 20 Hz durante 90 s (1800 datos).

Para impedir el ingreso de aire en el sistema neumático del tubo de Pitot durante las mediciones, se forzó un contraflujo continuo (Matos y Frizell, 2000; Matos et al., 2002). El contraflujo se controlaba mediante válvulas de aguja y para reducir la perturbación de las mediciones, la tasa de contraflujo se limitó a casi cero.

Wood (1983) determinó que la velocidad media a partir de la presión medida con el tubo de Pitot en los flujos bifásicos es:

$$V = \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\rho_w(1 - \lambda C_{aire})}} \quad (1)$$

donde V es la velocidad, g la aceleración de la gravedad, ΔP la diferencia entre la presión total y la presión estática, ρ_w la densidad del agua, C_{aire} la fracción de vacío local, y λ el coeficiente de derivación que tiene en cuenta el comportamiento no homogéneo del flujo aire-agua que se aproxima al punto de estancamiento del tubo de Pitot.

La región de recirculación puede afectar a las mediciones del tubo de Pitot (Matos y Frizell, 2000; Matos et al., 2002). Por esta razón, las velocidades locales se limitaron al chorro de la pared cerca de la región inferior.

3. Resultados y discusión

3.1. Fracción de vacío

La Fig. 2 presenta la fracción de vacío de forma adimensional en función de la relación X/B_j , siendo X la distancia del perfil vertical al punto de estancamiento y B_j el espesor del chorro de impacto. Siguiendo a Castillo et al. (2014), el espesor del chorro de impacto se definió como:

$$B_j = B_g + 2\xi = \frac{q}{\sqrt{2gH}} + 4\varphi\sqrt{h}(\sqrt{2H} - 2\sqrt{h}) \quad (2)$$

donde ξ es la distancia lateral de difusión del chorro por efectos de aireación y turbulencia y $\varphi = K_\varphi T_u$, siendo T_u la intensidad de turbulencia y K_φ un parámetro experimental de valor 1.24 para el caso de chorros bifásicos y tridimensionales (Castillo et al., 2014).

En función de la relación X/B_j los datos se han agrupado en cuatro subclases. Los valores de fracción de vacío más altos se obtuvieron cerca del fondo ($0.10 < y/y_{90} < 0.40$) e inmediatamente aguas abajo del punto de impacto o estancamiento, alcanzando valores próximos al 20%. A medida que el flujo se desplaza hacia aguas abajo disminuye la fracción de vacío detectada. Para $0.40 < y/y_{90} < 0.70$, la fracción de vacío tiende a un valor constante en la vertical en torno al 10%. Para valores de $y/y_{90} > 0.80$, cerca de la superficie libre, los valores de fracción de vacío aumentan rápidamente.

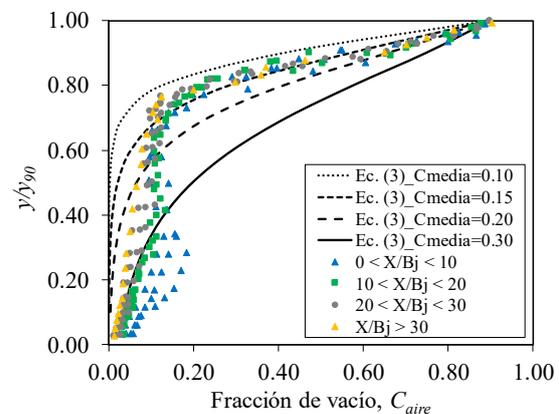


Figura 2. Perfiles de fracción de vacío aguas abajo del punto de estancamiento ($q = 0.099 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $Y = 0.30 \text{ m}$).

Estos valores obtenidos se han comparado con la ley teórica desarrollada por Chanson (1995) para una emulsión aire-agua de un flujo uniforme en equilibrio.

$$C_{air} = 1 - \tanh^2 \left(K' - \frac{y'}{2D'} \right) \quad (3)$$

donde K' es una constante de integración, D' es la difusividad turbulenta adimensional (asumiendo una turbulencia homogénea) e $y' = y/y_{90}$. K' y D' dependen de la concentración media y cuyos valores recogidos por Chanson se adjuntan a continuación:

Tabla 1. Constantes de Integración K' y difusividad turbulenta D' utilizados en la Ec. (3). Desde Chanson (1995).

C_{media}	D'	K'
0.01	0.007312	68.70445
0.05	0.036562	14.00290
0.10	0.073124	7.16516
0.15	0.109704	7.16516
0.20	0.146489	3.740068
0.30	0.223191	2.567688
0.40	0.311100	1.934650
0.50	0.423441	1.508251
0.60	0.587217	1.178924
0.70	0.878462	0.896627

Aunque la Ec. (3) no fue desarrollada para resaltos hidráulicos sumergidos, puede proporcionar un punto de referencia para la comparación.

En la Fig. 2 se ha representado la Ec. 3 para varias fracciones medias de vacío. Se puede observar que todos los datos experimentales medidos ($0 < X/B_j < 0.30$) y que poseen a una concentración media entre 0.15 y 0.25, tienden a caer entre las leyes teóricas de 0.10 y 0.20 para $y/y_{90} > 0.60$.

3.2. Distribución de velocidades

Las mediciones de velocidad media se obtuvieron con el tubo de Pitot con back-flushing corregido por la fracción de vacío local con la Ec. 1.

Estudios previos (Rajaratnam, 1965) han demostrado que los perfiles de velocidad en la dirección principal de flujo de resaltos hidráulicos al pie de aliviaderos de vertido libre, pueden compararse si se normaliza la velocidad con respecto a la velocidad máxima $V_{m\acute{a}x}$ en cualquier sección y, las distancias a la solera con la longitud característica δ_l , definida como la distancia al fondo donde se alcanza la velocidad local $V = V_{m\acute{a}x}/2$ y donde el gradiente de velocidad es negativo.

La velocidad máxima $V_{m\acute{a}x}$ y la escala de longitud δ_l se calcularon en cada sección transversal del resalto hidráulico sumergido. La Fig. 3 muestra los perfiles adimensionalizados de la velocidad en secciones transversales situadas entre 0.10 y 1.00 m, aguas abajo del punto de estancamiento. Las velocidades más altas se han registrado cerca del fondo y tienden a disminuir a medida que el flujo se desplaza hacia la superficie libre. Los resultados obtenidos también concuerdan con las fórmulas de distribución de velocidades adimensionales de chorros de pared y

resaltos hidráulicos, obtenidas por varios autores con las siguientes ecuaciones (Ec. 4, 5, 6, 7 y 8).

Görtler (1942), citado por Liu et al. (1998):

$$\frac{V_x}{V_{m\acute{a}x}} = 1 - \tanh^2 \left(0.881 \frac{y}{\delta_l} \right) \quad (4)$$

Rajaratnam (1976):

$$\frac{V_x}{V_{m\acute{a}x}} = e^{-0.693 \left(\frac{y}{\delta_l} \right)^2} \quad (5)$$

Lin et al. (2012):

$$\frac{V_x}{V_{m\acute{a}x}} = 2.3 \left(\frac{y}{\delta_l} \right)^{0.42} \left(1 - \operatorname{erf} \left(0.886 \frac{y}{\delta_l} \right) \right) \quad (6)$$

De Dios et al. (2017):

$$\frac{V_x}{V_{m\acute{a}x}} = 2.0 \left(\frac{y}{\delta_l} \right)^{1/7} \left(1 - \operatorname{erf} \left(0.55 \frac{y}{\delta_l} \right) \right) - 0.39 \quad (7)$$

Castillo et al. (2017):

$$\frac{V_x}{V_{m\acute{a}x}} = 1.48 \left(\frac{y}{\delta_l} \right)^{1/7} \left(1 - \operatorname{erf} \left(0.66 \frac{y}{\delta_l} \right) \right) \quad (8)$$

donde $\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt$.

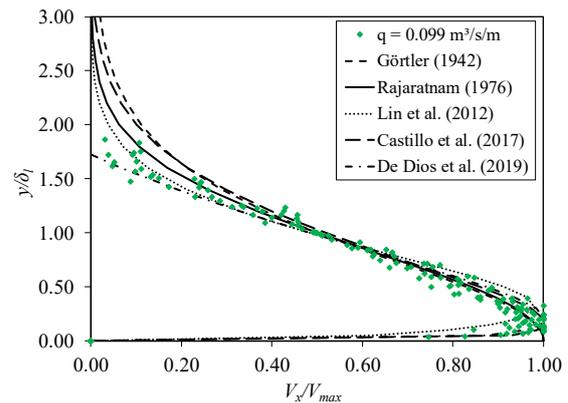


Figura 3. Perfiles de velocidad media horizontal en diferentes secciones del cuenco de disipación ($q = 0.099 \text{ m}^3/\text{s/m}$, $Y = 0.30 \text{ m}$) (adaptado de Carrillo et al., 2020).

4. Conclusiones

El estudio de los flujos bifásicos aire-agua es muy importante en las estructuras hidráulicas debido a la naturaleza no diluida del flujo.

En este trabajo se han analizado las características del flujo aire-agua producido aguas abajo de un aliviadero de vertido libre. Un equipo de fibra óptica y un tubo de Pitot con back-flushing fueron utilizados. Teniendo en cuenta las limitaciones de ambos equipos en la región de flujo prácticamente unidireccional, se pudo estimar la fracción de vacío y el campo de velocidad utilizando la corrección por aireación.

Se han obtenido los valores de fracción de vacío y velocidades más altos en la zona más próxima al fondo y tienden a disminuir conforme nos alejamos del mismo. Además, se han registrado los máximos valores para las secciones más cercanas al punto de estancamiento y disminuyen a medida que el flujo se

desplaza aguas abajo de la zona de impacto del chorro. La distribución de fracción de vacío tiende a ser sensiblemente superior con respecto a un flujo emulsionado uniforme en equilibrio, alcanzando valores del 20% hasta $y/y_{90} < 0.40$ y a partir de ahí, se mantiene sensiblemente constante (del orden de un 10%) hasta $y/y_{90} = 0.80$. Seguidamente aumenta rápidamente, pero con valores inferiores al flujo emulsionado uniforme en equilibrio (Fig. 2).

Los valores de velocidad media adimensionalizada coinciden sensiblemente con las leyes de distribución obtenidas por otros investigadores en el caso de chorros de pared y resaltos hidráulicos, colapsando en una sola ley para relaciones $y/\delta_l < 1.20$ (Fig. 3).

Agradecimientos

La primera autora agradece al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por la ayuda financiera recibida de la beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU), número de referencia FPU16/05658.

Los autores agradecen por el financiamiento recibido desde el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIU), la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), a través del Proyecto “La aireación del flujo en el vertido en lámina libre por coronación de presas a nivel de prototipo y su efecto en cuencos de disipación de energía” (RTI2018-095199-B-I00).

Referencias

- André, S., Boillat, J.L., and Schleiss, A.J. (2005). “Discussion of ‘Two-phase flow characteristics of stepped spillways’ by Robert M. Boes and Willi H. Hager”. *J. Hydraul. Eng.*, 131(5), 423-427.
- Boes, R., and Hager, W.H. (2003). “Two-phase flow characteristics of stepped spillways.” *J. Hydraul. Eng.*, 129(9), 661–670.
- Carrillo J.M., Marco F., Castillo, L.G., García J.T. (2020). “Analysis of two-phase flows in plunge pools of nappe jets.” *Proc. 8th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*, Chile.
- Castillo, L. G., Carrillo, J. M., & Blázquez, A. (2014). “Plunge pool mean dynamic pressures: a temporal analysis in nappe flow case”. *Journal of Hydraulic Research*, 53(1), 101-118.
- Castillo, L.G., Carrillo, J.M., and Bombardelli, F.A. (2017). “Distribution of mean flow and turbulence statistics in plunge pools.” *Journal of Hydroinformatics*, 19(2), 173-190.
- Chanson, H. (1995). Air bubble entrainment in free-surface turbulent flow. Report CH46/95, University of Queensland.
- De Dios, M., Bombardelli, F.A., García, C.M., Liscia, S.O., Lopardo, R.A., and Parravicini, J.A. (2017). “Experimental characterization of three-dimensional flow vertical structures in submerged hydraulic jumps.” *Journal of Hydro-environment Research*, 15, 1-12.
- FEMA. 2014. “Technical Manual: Overtopping Protection for Dams. Federal Emergency Management Agency.” FEMA P-1014, May. US Department of Homeland Security, USA.
- Lin, C., Hsieh, S.-C., Lin, I.-J., Chang, K.-A., and Raikar, R. V. (2012). “Flow property and self-similarity in steady hydraulic jumps.” *J. Exp. Fluids*, 53, 1591–1616.
- Matos, J., Frizell, K. H., André, S. and Frizell, K. W. (2002). “On the performance of velocity measurement techniques in air-water flows.” *Proc. Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002 Conference, EWRI-ASCE/IAHR*, Estes Park, Colorado, USA (ed. T. L. Wahl, C. A. Pugh, Kevin A. Oberg and T. B. Vermeyen), CD-ROM.
- Matos, J., and Frizell, K. H., (2000). “Air concentration and velocity measurements on self-aerated flow down stepped chutes.” *Proc. 2000 Joint Conf. on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management, ASCE*, USA.
- Rajaratnam, N. (1965). “The hydraulic jump as wall jet.” *Proc. ASCE J. Hydraul. Div.* 91 (HY5), 107–132.
- Rajaratnam, N. (1976). “Turbulent Jets.” Elsevier Scientific, Development in Water Science, 5, New York, USA.
- RBI-Instrumentation (2012). ISO Software user's guide.
- Stutz, B. (1996). “Analyse de la structure diphasique et instationnaire de poches de cavitation.” *PhD Thesis*, Institut National Polytechnique de Grenoble, France (in French).
- Wahl, T.L., Frizell, K.H., and Cohen, E.A. (2008). “Computing the trajectory of free jets.” *J. Hydraul. Eng.*, 134(2), 256–260.
- Wood, I. R. (1983). “Uniform region of self-aerated flow.” *Journal of Hydraulic Div., ASCE*, 109(3), 447–461.

Análisis experimental de frecuencia de interferencia y fracciones de vacío en chorros turbulentos rectangulares

Experimental analysis of frequency of interference and void fractions in rectangular turbulent jets

(Recepción 09/03/2020; Aceptación 20/05/2020)

Ortega P.R.^{1,2}; Castillo L.G.¹; García J.T.¹

¹ Escuela de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas
Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)
Paseo Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena, España
Teléfono: 868071014

² Escuela Politécnica Nacional
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental Quito, Ecuador
Email: patricio.ortega@epn.edu.ec

Resumen. *El incremento de las avenidas de diseño en presas, exige hoy en día la evaluación de los criterios actuales de diseño y de la capacidad de descarga de las mismas. El sobrevertido por coronación es uno de los mecanismos considerados para una posible operación de desagüe como consecuencia de la elevación del nivel del embalse. Este mecanismo puede ocasionar daños en la cimentación y cuenco de disipación de energía si los chorros incidentes no están debidamente aireados. El presente estudio experimental evalúa el proceso de aireación de un chorro rectangular turbulento durante su caída, para medir las propiedades agua-aire se utilizó una sonda de conductividad construida y diseñada en la Universidad Politécnica de Cartagena (España).*

Palabras clave. *Sonda de conductividad, chorro rectangular turbulento, fracción de vacío, sobrevertido.*

Abstract. *The increase in flood dam design, requires evaluating the current design criteria and discharge capacity of many dams. Overtopping is one of the mechanisms considered for a possible spillway operation due to the rise in reservoir level. This mechanism can cause damage to the foundations and the energy dissipation basin if the incident jets are not properly aerated. The present experimental study evaluates the aeration process of rectangular free-falling jets along its fall. A conductivity probe was used to measure the air-water properties; this device was built and designed at Universidad Politécnica de Cartagena (Spain).*

Keywords. *Conductivity probe, rectangular free-falling jet, void fraction, overtopping.*

1. Introducción

En los últimos años, se han planteado nuevos escenarios para el diseño hidráulico de las presas debido al incremento en la magnitud de las crecidas. Estos nuevos criterios permiten una re-evaluación de la capacidad de diseño actual en estructuras de descarga en presas y de los efectos hidrodinámicos de los chorros de sobrevertido en cuencos de disipación de energía al pie de presa (FEMA, 2014).

Es común que tal como ocurre en la naturaleza, en ríos, olas de mar, cascadas, se encuentren flujos bifásicos agua-aire en las estructuras hidráulicas como disipadores de energía, rápidas lisas o escalonadas.

El fenómeno de aireación de un chorro turbulento es complejo y actualmente se están desarrollando algunos estudios para su interpretación. Uno de los mecanismos más utilizados para la disipación de energía en presas es la descarga de chorros rectangulares turbulentos en la atmósfera, donde se experimenta una reducción de la velocidad y de su energía cinética a medida que el chorro incrementa su caída. En este proceso se introduce aire en la masa de

agua, produciéndose la aireación y dispersión del chorro. De acuerdo a Ervine et al. (1987) la turbulencia es el principal mecanismo para la introducción de aire en los chorros de descarga libre. El ancho del chorro incidente (B_j) es el ancho del núcleo reducido por efecto del campo gravitacional más el esponjamiento producido por la introducción de aire y la dispersión del chorro (Castillo et al. 2015). Las características agua-aire de chorros rectangulares de descarga libre influyen directamente en la aireación y turbulencia de los cuencos de disipación de energía.

El presente estudio tiene por objetivo analizar las propiedades bifásicas agua-aire de un chorro rectangular de caída libre: la fracción de vacío (C) y frecuencia de interferencia de fase (F).

2. Materiales y Métodos

2.1. Instalación experimental

La Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) dispone de una instalación experimental especial para el estudio de chorros rectangulares turbulentos y de

cuenchos de disipación de energía. La instalación está ubicada en el Laboratorio de hidráulica de la UPCT, y ésta dispone de un canal de ingreso de 4.00 m de largo, 1.05 m de ancho y 1.0 m de alto. En la parte aguas abajo del canal existe un vertedero rectangular de cresta delgada con alturas de caída variable. En la Figura 1 se puede apreciar una vista tridimensional de la instalación experimental para el estudio de chorros turbulentos.

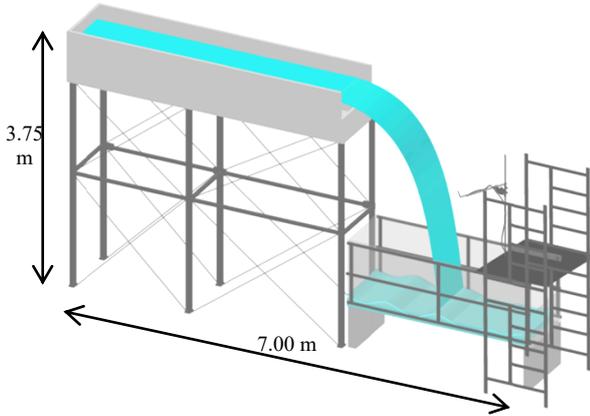


Figura 1. Instalación experimental para el estudio de chorros rectangulares turbulentos, Laboratorio de Hidráulica UPCT.

2.2. Instrumentación

Para analizar las propiedades agua-aire en chorros turbulentos se ha diseñado y construido una sonda de conductividad en la Universidad Politécnica de Cartagena.

Estas sondas detectan la diferente resistividad/conductividad del agua y el aire. Mediante un sistema de adquisición de datos se registran las señales de salida (Chanson, 2004). La punta de la sonda de conductividad consta de un electrodo de platino de diámetro $\varnothing = 0.25$ mm. Cada medición fue registrada con una frecuencia de 20 kHz durante 45 s. En la Figura 2 se indica la medición del chorro con la sonda de conductividad.

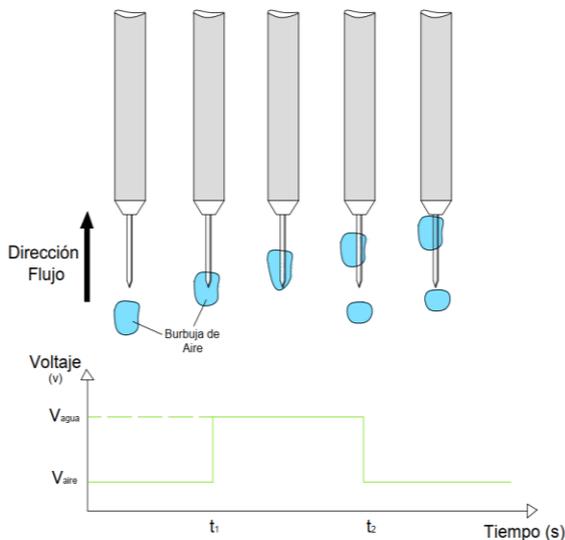


Figura 2. Sonda de conductividad en chorro rectangular UPCT.

La señal analógica es transformada en una señal cuadrada utilizando el criterio de umbral simple de corte al 50% del voltaje total (Toombes, 2002). Las propiedades bifásicas agua-aire fueron obtenidas mediante el procesamiento de señales con un programa escrito en MATLAB R2017a.

2.3. Condiciones experimentales

Las mediciones fueron realizadas para diferentes alturas cada 0.20 m, considerando alturas de caída entre $0.0 \text{ m} < Z < -2.0 \text{ m}$ (Carrillo et al. 2020). El caudal unitario de ensayo es $q = 0.072 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. La carga sobre el vertedero rectangular de pared delgada es $h_o = 0.11 \text{ m}$. En la Figura 3 se indica un esquema de las características experimentales.

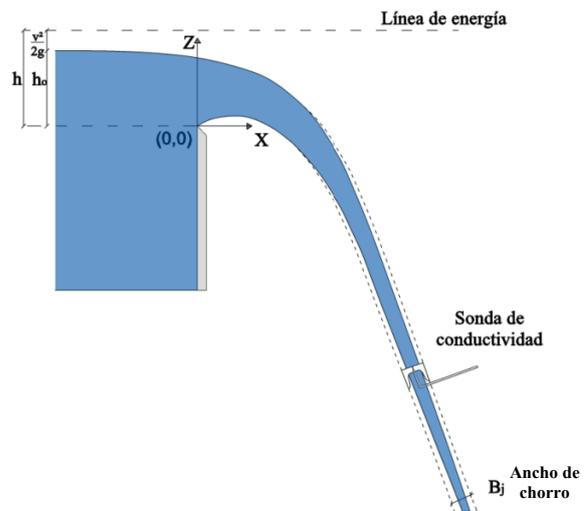


Figura 3. Representación esquemática de un chorro rectangular turbulento.

Posibles efectos de escala pueden afectar las condiciones iniciales del chorro. Para minimizar este efecto es necesario que las cargas sobre el vertedero de cresta delgada sean $h \geq 0.045 \text{ m}$ y números de Weber $We > 10^3$ en chorros verticales (Chanson 2009, Heller 2011).

3. Resultados y Discusión

3.1. Fracción de vacío

La fracción de vacío promedio C es la proporción de tiempo que la punta (sensor) de la sonda de conductividad está en contacto con el aire dividido para el tiempo total de muestreo ($C = \sum t_i / t$).

La Figura 4 indica los perfiles de fracción de vacío desde $0.0 \text{ m} < Z < -2.00 \text{ m}$. Para los perfiles hasta $Z = -1.20 \text{ m}$ se puede evidenciar fracciones de vacío $C = 0.0$ lo que significa que el núcleo interno de agua se mantiene durante el descenso inicial.

Para los perfiles $Z > -1.40 \text{ m}$ se inicia la aireación del chorro y el núcleo de agua desaparece. Conforme avanza las alturas de caída, la aireación en la parte central del chorro aumenta hasta llegar a fracciones de vacío del orden de $C = 0.40$.

3.2. Frecuencia de interferencia

La frecuencia de burbujas o frecuencia de interferencia F es analizada por muchos autores (Felder, 2013) y en distintos fenómenos hidráulicos. Esta se define como el número de burbujas que impactan el sensor de la sonda de conductividad por segundo.

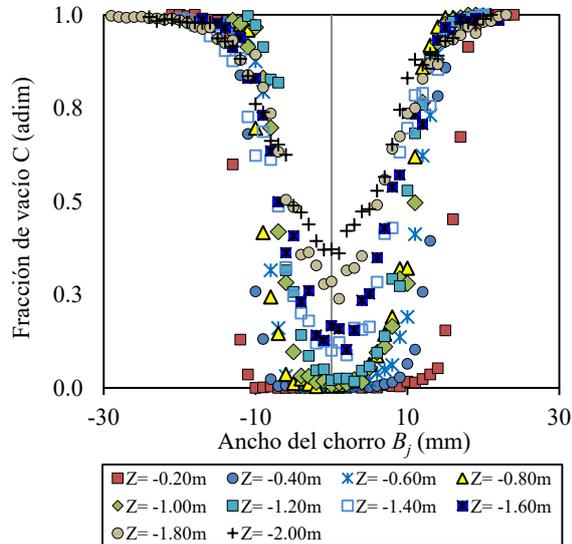


Figura 4. Fracción de vacío $q = 0.072 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

La Figura 5 indica la variación de la frecuencia de interferencia en el chorro rectangular para alturas de caída entre $0.0 \text{ m} < Z < -2.00 \text{ m}$. A mayor altura de caída se registran las frecuencias de interferencia más altas entre $20 \text{ Hz} < F < 30 \text{ Hz}$. En el inicio del chorro se puede evidenciar dos zonas con picos máximos correspondientes a la parte exterior e interior del chorro. Este comportamiento cambia para valores de $Z > -1.20 \text{ m}$.

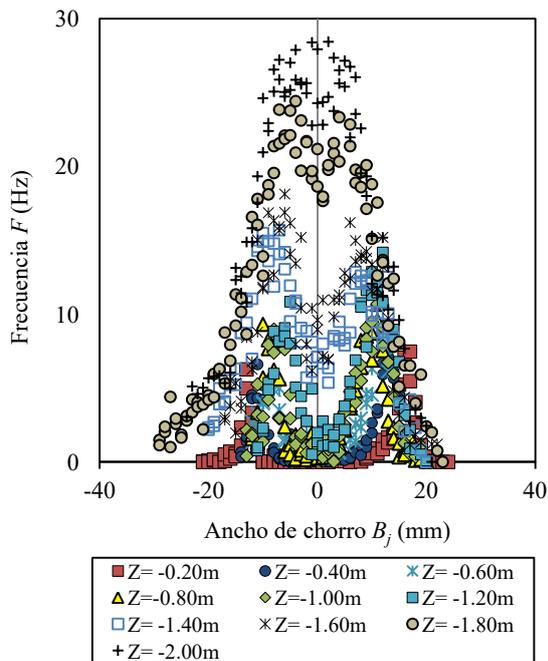


Figura 5. Frecuencia de interferencia de fase, para distintas caídas Z , $q = 0.072 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

Al inicio del descenso del chorro ($Z = -0.20 \text{ m}$) los valores de frecuencia de interferencia son cercanos a cero, sin embargo, para puntos más bajos ($Z = -2.0 \text{ m}$) las fracciones de vacío registran valores altos de frecuencia de interferencia; esto debido a que el núcleo desaparece y la aireación se incrementa.

4. Conclusiones

La aireación del chorro durante la caída se debe principalmente a los efectos de la turbulencia en la superficie libre. A medida que el chorro descende éste adquiere mayor velocidad por efecto de la fuerza de gravedad disminuyendo el ancho del núcleo del chorro para progresivamente desaparecer. Para alturas de caída mayores a $Z > -1.20 \text{ m}$ se evidencia una mayor introducción de aire cuyos valores mínimos de fracción de vacío alcanzan valores de $C = 0.40$. A mayor altura de caída, la frecuencia de interferencia de burbujas aumenta como resultado de una mayor aireación en la parte más baja. Un mejor conocimiento del proceso de aireación en chorros rectangulares, producido por el sobrevertido de presas, ayudará a mejorar el diseño en las mismas.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento por el financiamiento recibido del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), proyecto “The flow aeration in the free surface overtopping of dams in prototype situations and his effect in energy dissipation plunge pools” (RTI2018-095199-B-I00).

Un agradecimiento especial al Dr. José María Carrillo por el apoyo y soporte científico-técnico al presente proyecto. Finalmente el primer autor agradece la ayuda económica facilitada por la Escuela Politécnica Nacional en base al programa de movilidad de profesorado para realizar estudios de doctorado.

Referencias

Castillo, L., Carrillo, J.M., and Blázquez, A. (2015). “Plunge pool mean dynamic pressures: a temporal analysis in nappe flow case”. *Journal of Hydraulic Research* 2015; 53(1):101–118.

Carrillo, J.M., Ortega, P.R., Castillo, L.G., García, J.T. (2020). “Air entrainment in rectangular free-falling jets”. Aceptado para su publicación en *Proceedings 8th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*, Santiago, Chile.

Chanson, H. (2004). “Air-water Flows in Water Engineering and Hydraulic Structures. Basic Processes and Metrology”. *Hydraulics of Dams and River Structures*, London, ISBN 90 5809 632, 73-16.

Chanson, H. (2009). “Turbulent air-water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects”. *Environ Fluid Mech* 2009; 9:125-142.

Ervine, D. A., Falvey, H. (1987). “Behaviour of turbulent jets in the atmosphere and plunge pools”.

Proceedings of the Institutions of Civil Engineers 1987; 83(2):95-314.

FEMA. (2014). "Technical Manual: Overtopping Protection for Dams". Federal Emergency Management Agency. FEMA P-1014, May. *US Department of Homeland Security*, USA.

Felder, S. (2013). "Air-water flow properties on stepped spillways for embankment dams: aeration, energy dissipation and turbulence on uniform, non-uniform and pooled stepped chutes". *PhD Thesis*. School of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia.

Heller, Valentin. (2011). "Scale effects in physical hydraulic engineering models". *Journal of Hydraulic Research* 2011; 49(3):293-306.

The MathWorks, Inc. (2017). "MATLAB R2017a." Natick, Massachusetts, United States.

Toombes, L. (2002). "Experimental study of air-water flow properties on low-gradient stepped cascades". *PhD Thesis*. School of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia.

Modificación de series históricas de precipitación con base en escenarios climáticos futuros. El caso de estudio de la cuenca del río Con (Galicia)

Perturbation of historic rainfall series based on future climate scenarios. A study case of the river Con basin (Galicia)

(Recepción 29/01/2020;

Aceptación 25/05/2020)

García-Alén, G.¹; Cea, L.¹; Bermúdez, M.^{1,2}

¹Universidade da Coruña, Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA), A Coruña, España

²Universidad de Granada, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía (IISTA), Granada, España

Email: g.glores@udc.es luis.cea@udc.es maria.bermudez@udc.es

Resumen. La predictibilidad climática cobra cada vez más relevancia a medida que se comprenden los posibles efectos que tiene y tendrá el cambio climático. El desarrollo de metodologías que permitan incorporar los efectos del cambio climático se convierte en un elemento clave en los estudios hidrológicos e hidráulicos. En este artículo se describe la aplicación de una metodología de perturbación climática desarrollada por la Universidad Católica de Lovaina, que permite modificar series de precipitación históricas de acuerdo con escenarios climáticos futuros. La metodología se aplica a una cuenca gallega, observándose un descenso general tanto en precipitación máxima diaria como en número de días lluviosos.

Palabras clave. Inundación, hidrología, escurrentía, cambio climático

Abstract. Climate prediction is becoming more and more relevant as we understand the possible effects that long-term climate change will have. The development of methodologies that allow the incorporation of climate change considerations becomes a key element in hydrological and hydraulic studies. This article describes the application of a methodology of climatic perturbation developed by KU Leuven to the historic rainfall series of a Galician basin. The results indicate a general decrease both in maximum daily precipitation and in the amount of wet days.

Keywords. Flood, hydrology, runoff, climate change

1. Introducción

La estimación de inundaciones es clave en la planificación territorial y en la evaluación del riesgo en los asentamientos de la población. Desde el año 1980 han sido notificadas en Europa 1500 inundaciones de las cuales más de la mitad han ocurrido desde el año 2000 (IPCC, 2014), observándose una clara modificación tanto en la frecuencia como en las intensidades de los episodios de lluvia extremos. Muchas de estas variaciones han sido atribuidas en gran medida al cambio climático y resulta por tanto necesario incorporar sus efectos a la planificación del riesgo de inundación. Los actuales modelos climáticos globales proporcionan, sin embargo, proyecciones que no son directamente aplicables a los estudios de inundabilidad locales debido a su resolución espacial y temporal.

Bajo estas circunstancias, esta investigación constituye un primer paso para evaluar el efecto que tendrá el cambio climático en la frecuencia de avenidas en el noroeste de España, elaborando escenarios climáticos futuros para el cálculo hidrológico de avenidas en cuencas de Galicia. Tomando como caso de estudio la cuenca del río Con

en Vilagarcía de Arousa, se describe la metodología llevada a cabo para modificar las series de precipitación históricas de esta cuenca de acuerdo con escenarios climáticos futuros. Dicha metodología está basada en la aplicación de una técnica de downscaling estadístico desarrollada por la Universidad Católica de Lovaina (Uytven and Willems, 2015).

2. Metodología

2.1. Caso de estudio y series históricas

Como caso de estudio se considera la cuenca del río Con en Vilagarcía de Arousa, en la provincia española de Pontevedra. Esta cuenca cuenta con una extensión aproximada de 24 km² y una topografía relativamente abrupta con pendientes pronunciadas (cota máxima y mínima de 640 y 4 m.s.n.m., respectivamente). Su tiempo de concentración es bajo (170 minutos).

Como datos de partida se toman las series diezminutales de precipitación de 15 estaciones meteorológicas de la red de estaciones de MeteoGalicia próximas al núcleo de Vilagarcía de Arousa (Tabla 1). La selección de las estaciones se ha llevado a cabo basándose en el objetivo final de



conseguir un número representativo espaciado adecuadamente en la cuenca, pero priorizando entre aquellas estaciones que proporcionan series de mayor longitud y calidad.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis

Estación	Periodo de registro	Ubicación (UTM H29 – WGS84)	
Corón	2002-2018	42.5801	-8.8047
Tremoedo	2010-2018	42.5399	-8.7844
Torrequeintás	2011-2018	42.5371	-8.7161
Barrantes	2012-2018	42.5048	-8.7680
Pé Redondo	2012-2018	42.5072	-8.7267
A Lanzada	2012-2018	42.4575	-8.8760
Castrove	2001-2018	42.4593	-8.7043
Simes	2012-2017	42.4363	-8.7747
Sálvora	2006-2018	42.4649	-9.0136
Lourizán	2007-2018	42.4092	-8.6642
Corrubedo	2000-2018	42.5552	-9.0286
Ons	2005-2017	42.3821	-8.9362
Xesteiras	2010-2018	42.6756	-8.5862
Muralla	2001-2018	42.7456	-8.7763
Cespón	2011-2018	42.6747	-8.8546

2.2. Método de *downscaling*

Para obtener series de precipitación para escenarios futuros se utiliza la técnica de *downscaling* estadístico conocida como método de perturbación de cuantiles (Willems and Vrac, 2011), implementada en la herramienta de perturbación climática desarrollada por la Universidad Católica de Lovaina (Van Uytven and Willems, 2015)

Esta herramienta permite modificar las series de precipitación históricas. Su metodología de perturbación considera los cambios en las frecuencias de día seco y día lluvioso y los cambios en la intensidad de precipitación. Estos últimos, se basan en cuantiles para tener en cuenta el hecho de que los cambios pueden depender de la magnitud del evento o de su periodo de retorno. La modelización de estas perturbaciones ha sido integrada en el programa basándose en modelos climáticos de entrada de una longitud aproximada de 30 años (Ntegeka *et al.*, 2014).

2.3. Escenarios climáticos futuros

La herramienta anterior modifica las series de precipitación en base a escenarios climáticos futuros. En este estudio, se han usado 170 simulaciones de modelos climáticos globales obtenidos del archivo de datos del CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*). Este proyecto estudia la predictibilidad climática explorando la capacidad de los modelos para predecir el clima en diferentes escalas de tiempo.

La herramienta de perturbación, se enfoca así en la proyección de las series históricas de precipitación en función de 4 escenarios climáticos basados en 4

Sendas Representativas de Concentración (RCP): RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5. Cada uno de estos RCP viene caracterizado por el forzamiento radiactivo en Wm^{-2} (2.6, 4.5, 6.0 y 8.5) estimado para el año 2100.

2.4. Aplicación al caso de estudio

A partir de los GCM existentes, se calculan las perturbaciones para cada simulación del modelo climático, comparando las precipitaciones en el periodo de control (1960-1990) con el periodo escenario (2071-2100). Posteriormente, estas perturbaciones son aplicadas a las series históricas, cuya longitud es variable de acuerdo con el período de registro (Tabla 1). De esta forma, se aplica el método de *downscaling* estadístico a través del cual se modifica la frecuencia de los días lluviosos y se aplican cambios relativos a los cuantiles cuando la cantidad total diaria de lluvia es de al menos 0.1 mm (Uytven and Willems, 2015).

Cabe señalar que no se han producido alteraciones importantes en cuanto a cobertura o usos del suelo en la cuenca de estudio, así como en lo que se refiere a infraestructura hidráulica, entre el período de control del modelo climático y el período de registro de las estaciones meteorológicas.

3. Resultados y discusión

Una vez obtenidas las series perturbadas para las 170 simulaciones de los modelos climáticos, se ordenan y se calcula la serie de valor mediana, el percentil 90 y el percentil 10 para cada uno de los escenarios (RCPs). Así, se obtienen doce series perturbadas representativas para cada una de las estaciones pluviométricas analizadas. En la Figura 1, a través del análisis del caso particular de los datos procedentes de la estación meteorológica del Con, se puede observar el porcentaje de cambio de precipitación máxima diaria que sufren las series con respecto a su valor de precipitación máxima diaria original.

Los modelos climáticos que producen un mayor porcentaje de cambio tanto en la precipitación como en el número de días lluviosos, son los correspondientes al RCP 8.5. Observando la mediana de los modelos climáticos, se puede decir que, en general, estos escenarios dirigen las series de precipitación a un descenso tanto en la precipitación como, especialmente, en el número de días lluviosos. Este descenso es particularmente acusado durante los meses de junio a septiembre, coincidiendo con la época de estío. No obstante, la predicción mediana apunta en paralelo a un posible incremento de la precipitación máxima diaria en los meses de invierno y otoño. Nótese, además, que el hecho de que disminuya la precipitación total no implica que disminuyan también los picos de precipitación. Los efectos del cambio climático podrían provocar la concentración de los eventos de fuerte precipitación en cortos periodos, seguidos por periodos de estiaje de mayor persistencia.

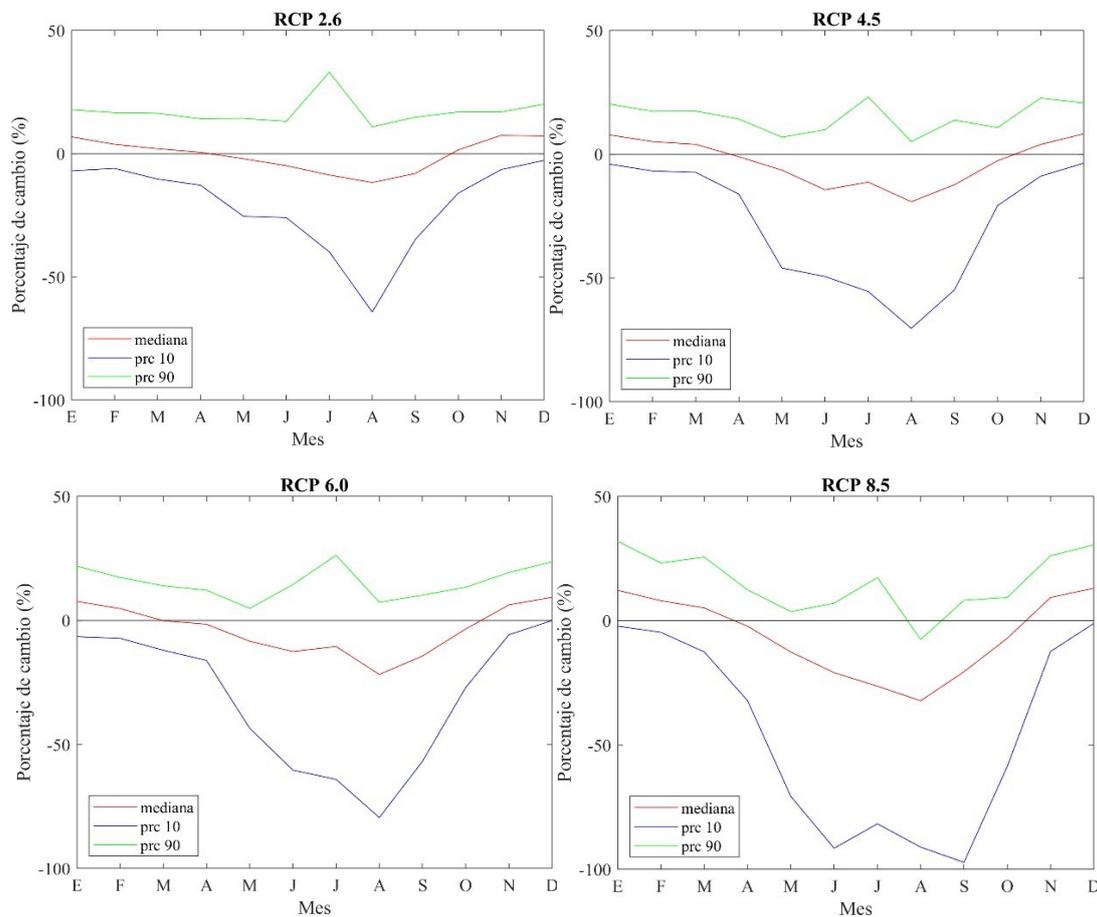


Figura 1. Porcentaje de variación aplicado por la herramienta de perturbación en la serie de precipitación de la estación meteorológica de Corón.

4. Conclusiones

Las herramientas de perturbación climática son instrumentos muy útiles en los estudios hidrológicos e hidráulicos. Sin embargo, debido a la gran incertidumbre con la que se trabaja en estudios climáticos a tan largo plazo, todavía no es posible su aplicación directa en predicciones hidrológicas futuras. Pese a esto, los resultados obtenidos sí muestran una tendencia general consistente entre los diferentes escenarios climáticos.

Con estas nuevas series de precipitación, es posible estimar hietogramas de diseño representativos de la cuenca para cada uno de los posibles futuros escenarios y analizar así el efecto real que tendrían en la cuenca del río Con.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Hidráulica de KU Leuven, en particular a P. Willems y a E. Van Uytven, por facilitar la herramienta de perturbación climática. M. Bermúdez agradece su financiación del Programa UE-H2020 a través de la acción Marie

Sklodowska-Curie (nº 754446) y el Plan Propio de Investigación y Transferencia de la UGR - Athenea3i.

Referencias

IPCC. “Climate Change 2014: Synthesis Report.” *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, 2014, doi:10.1017/CBO9781107415324.

Ntegeka, Victor, et al. “Developing Tailored Climate Change Scenarios for Hydrological Impact Assessments.” *Journal of Hydrology*, vol. 508, Elsevier B.V., 2014, pp. 307–21, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.11.001.

Van Uytven, E., and P. Willems. *Climate Perturbation Tool*. Manual. September, 2015.

Willems, P., and M. Vrac. “Statistical Precipitation Downscaling for Small-Scale Hydrological Impact Investigations of Climate Change.” *Journal of Hydrology*, vol. 402, no. 3–4, Elsevier B.V., 2011, pp. 193–205, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.02.030.

Análisis de un vertedero tipo laberinto con Iber

Analysis of a labyrinth weir with Iber

(Recepción 04/03/2020; Aceptación 04/08/2020)

Ros-Casajús, M.¹; Viguera-Rodríguez, A.¹

¹Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas,
Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 52, 30203, Cartagena (España)

Email: mercedesroscasajus@gmail.com

Resumen. En las últimas décadas, el avance del conocimiento sobre la hidráulica de vertederos tipo laberinto se ha realizado principalmente en modelos físicos. En este estudio, se realizaron simulaciones numéricas de vertederos tipo laberinto en régimen de descarga libre utilizando el código bidimensional Iber. Las simulaciones consideraron tres enfoques diferentes y se compararon con datos experimentales previamente publicados. Aunque el problema es tridimensional, se encontró un ajuste relativamente adecuado (diferencias entre el 10 y 20%) en el coeficiente de descarga para valores de carga sobre vertedero elevados.

Palabras clave. Vertederos tipo laberinto; coeficiente de descarga; Iber.

Abstract. In recent decades, the advancement of knowledge on the hydraulics of labyrinth weirs has resulted mainly from physical modeling. In this study, numerical simulations of free-flow labyrinth weirs were conducted using a two-dimensional code, considering three different approaches. These simulations were compared with experimental data previously published. Although the phenomenon is three dimensional, relative good agreement was found on the discharge capacity coefficient for larger energy head over the weir.

Keywords. Labyrinth weir; discharge coefficient; Iber.

1. Introducción

Los vertederos no lineales tipo laberinto son estructuras de desborde con forma quebrada de su trazado en planta. El planteamiento no lineal del labio del vertedero les proporciona una longitud efectiva total mayor que la longitud de un vertedero de pared delgada rectilíneo de igual ancho. Por lo general, el trazado del laberinto se repite en módulos o ciclos.

Debido a su forma poligonal, los vertederos tipo laberinto pueden proporcionar una capacidad de descarga más alta que la de los vertederos de pared recta para el mismo ancho y la carga sobre vertedero.

Los vertederos tipo laberinto son de particular interés cuando el ancho de la estructura de control es limitado, como en la rehabilitación de estructuras hidráulicas existentes, cuando es necesario aumentar el caudal de descarga proyectado. También son estructuras adecuadas para situaciones donde la altura máxima disponible es reducida.

Dado que los vertederos tipo laberintos son estructuras de relativamente bajo costo en comparación con los aliviaderos con compuertas, a menudo se usan en el recrecido de presas para aumentar el volumen de almacenamiento (Schleiss, 2011).

Aunque se han llevado a cabo considerables estudios experimentales (Tullis et al. 2007, Lopes et al. 2009, Crookston y Tullis 2013), es necesario mejorar el conocimiento de la caracterización del flujo de aproximación sobre los vertederos tipo laberinto en descargas libres y sumergidas con herramientas informáticas.

Debido a la componente fuertemente tridimensional de este tipo de vertederos, han sido mayoritariamente analizados mediante métodos experimentales, siendo muy pocos los estudios realizados numéricamente con modelos tridimensionales de tipo CFD.

En los últimos años se han realizado avances en la modelización numérica tridimensional de estas estructuras.

Salazar et al. (2015) simularon con Kratos vertederos tipo laberinto con un ángulo de 7.45° y obtuvieron resultados razonablemente buenos con los valores propuestos por Crookston y Tullis (2013). Para pequeñas relaciones de carga total/altura del vertedero (H_t/P), las diferencias relativas fueron de alrededor del 12%, mientras que para relaciones H_t/P entre 0.4 y 0.8, las diferencias fueron de alrededor del 2%.

Savage et al. (2016) compararon datos experimentales y simulaciones CFD con FLOW-3D para expandir el rango de H_t/P de la curva de ajuste propuesta por Crookston y Tullis (2013) para ángulos de 15° hasta 2.1° . Los errores relativos se limitaron a 6.4% para $H_t/P = 0.502$, y mostraron una tendencia a disminuir para valores mayores de H_t/P .

Carrillo et al. (2019) analizaron un vertedero tipo laberinto con ANSYS CFX. Las diferencias relativas máximas entre los resultados numéricos y los datos experimentales fueron inferiores al 1.0% para descarga libre y 3.6% para condiciones de descarga sumergida.

Teniendo en cuenta el elevado coste computacional de los modelos tridimensionales, este estudio tiene como objetivo analizar la capacidad de un modelo bidimensional para resolver vertederos no lineales

tipo laberinto de diferentes ángulos. En el estudio se analizan los coeficientes de descarga en descarga libre para aliviaderos no lineales tipo laberinto con ángulos entre 6 y 35°, considerando tres enfoques de simulación diferentes. Las simulaciones se llevaron a cabo aplicando Iber, un software bidimensional para la simulación de flujo en lámina libre en ríos y estuarios no estratificados.

2. Metodología

2.1. Estudio experimental

Los datos experimentales se han obtenido de Crookston (2010) y de Crookston y Tullis (2013). Los ensayos se realizaron en un canal de 1 m de ancho y 14.6 m de longitud (Fig. 1), donde se dispusieron dos módulos de laberinto con paredes y fondo acrílicos ($n = 0.01$). La altura del vertedero tipo laberinto fue $P = 0.3048$ m. La altura sobre vertedero se midió en todos los casos a una distancia $3P$ aguas arriba de la estructura.



Figura 1. Aliviadero en laberinto. “Half-Round”, con ángulo $\alpha=12^\circ$ (Fuente: Crookston, 2010).

2.2 Modelo Iber

Iber es un modelo bidimensional para la simulación hidráulica compuesta por diferentes módulos, entre ellos, el hidrodinámico que resuelve las ecuaciones de Saint Venant 2D o de aguas poco profundas utilizando el método de volúmenes finitos (Iber, 2012).

El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos, y el flujo de marea en estuarios.

Como condiciones de contorno se han empleado la elevación de la lámina de agua tanto a la entrada como a la salida. La forma de introducir el aliviadero varía para cada hipótesis presentada más adelante.

Para resolver la turbulencia se ha empleado el modelo $k-\epsilon$, siendo éste el único modelo de dos ecuaciones que tiene implementado el código del programa.

Las simulaciones se realizan para vertederos tipo laberinto con perfil redondeado aguas arriba y aguas abajo (Half Round).

2.3. Coeficiente de descarga

La ecuación general de descarga en vertederos propuesta por Crookston y Tullis (2013) es

$$Q = \frac{2}{3} C_{d(\alpha^\circ)} L_c \sqrt{2g} H_T^{3/2} \quad (1)$$

donde Q es el caudal total, $C_{d(\alpha^\circ)}$ un coeficiente experimental que depende del ángulo del laberinto y de la relación carga total/altura del vertedero (H_T/P), L_c la longitud de la línea central de la cresta del laberinto, y g la aceleración de la gravedad.

Esta ecuación no se corresponde con la expresión de descarga en vertedero utilizada por Iber.

$$Q = C_d B h^{1.5} \quad (2)$$

donde Q es el caudal total, C_d el coeficiente de descarga, B la longitud del vertedero (o ancho del canal), y h la carga sobre vertedero.

Para analizar correctamente el funcionamiento de vertederos tipo laberinto en Iber se plantea el uso del coeficiente de descarga modificado respecto al considerado por Crookston y Tullis (2013):

$$C_{d,Iber} = \frac{2}{3} C_{d(\alpha^\circ)} \sqrt{2g} \quad (3)$$

2.4. Hipótesis de simulación

Se han considerado 3 tipos de simulaciones:

- Hipótesis 1.

Se introduce la geometría del aliviadero en laberinto como condición interna tipo vertedero (Fig. 2). Los datos de entrada son el coeficiente de descarga modificado (Ec. 3), el porcentaje de longitud de vertedero (100%) y la cota del vertedero, P .

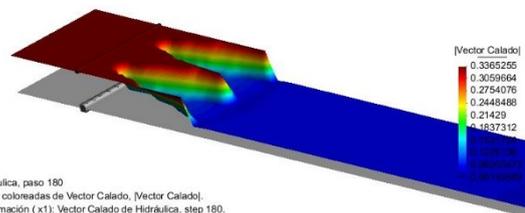


Figura 2. Calados obtenidos en Iber tras la simulación para un aliviadero de 10° y perfil “half-round” para $H_T/P=0.01$.

- Hipótesis 2.

Se considera la geometría del aliviadero lineal y se le asigna la condición interna tipo vertedero (Fig. 3). Esta hipótesis considera el caso límite de un vertedero tipo laberinto con ángulo de 90° . Para ello, la longitud del vertedero se magnifica sobre la longitud del vertedero lineal con:

$$\%Longitud\ del\ vertedero = \frac{L_c}{B} \times 100 \quad (4)$$

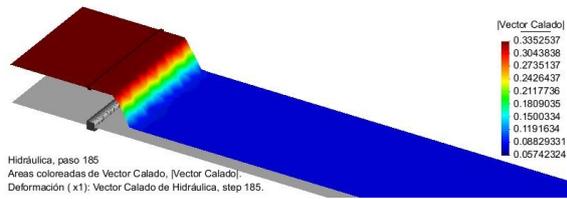


Figura 3. Calados obtenidos en Iber tras la simulación para un aliviadero de 10° para $H/P=0.1$.

• Hipótesis 3.

En esta hipótesis no se considera el vertedero como una condición interna del programa, si no que se introduce la geometría del aliviadero en laberinto como una elevación sobre el terreno, trabajando en tres dimensiones (ancho y largo del canal y cota del aliviadero). Para ello se ha considerado que Iber no es capaz de procesar datos con paredes completamente verticales, ya que al ser un programa de volúmenes finitos bidimensional, una pared vertical no tendrá asociada un área en el plano XY, imposibilitando el cálculo del esquema de volúmenes finitos. Por este motivo se introduce el vertedero con las paredes ligeramente inclinadas tomando como longitud característica la línea central del vertedero (Fig. 4).

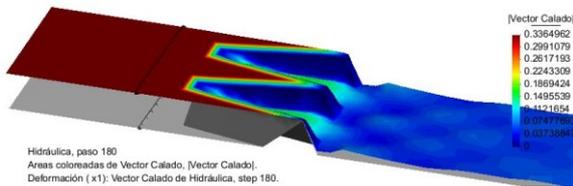


Figura 4. Calados obtenidos en Iber tras la simulación para un aliviadero de 10° y perfil "half-round" para $H/P=0.1$.

2.5. Análisis de sensibilidad

El tamaño de malla se obtuvo a base de pruebas hasta obtener una combinación en la que reducir el tamaño no influyera sobre los resultados de la simulación.

Reducir más el tamaño del mallado implicaba aumentar el tiempo de cálculo sin obtener mejores resultados del coeficiente de descarga.

Tras realizar los respectivos análisis de sensibilidad en las 3 hipótesis, se ha considerado un tamaño de mallado de 7 cm en las hipótesis 1 y 2, y de 10 cm en la hipótesis 3, como valores representativos de cada hipótesis considerada.

3. Resultados

Los coeficientes de descarga se obtienen en función de la carga sobre vertedero, la longitud del labio del

vertedero y el caudal descargado (Ros-Casajús, 2019).

La Figura 5 muestra los resultados del coeficiente de descarga obtenidos con las distintas hipótesis consideradas.

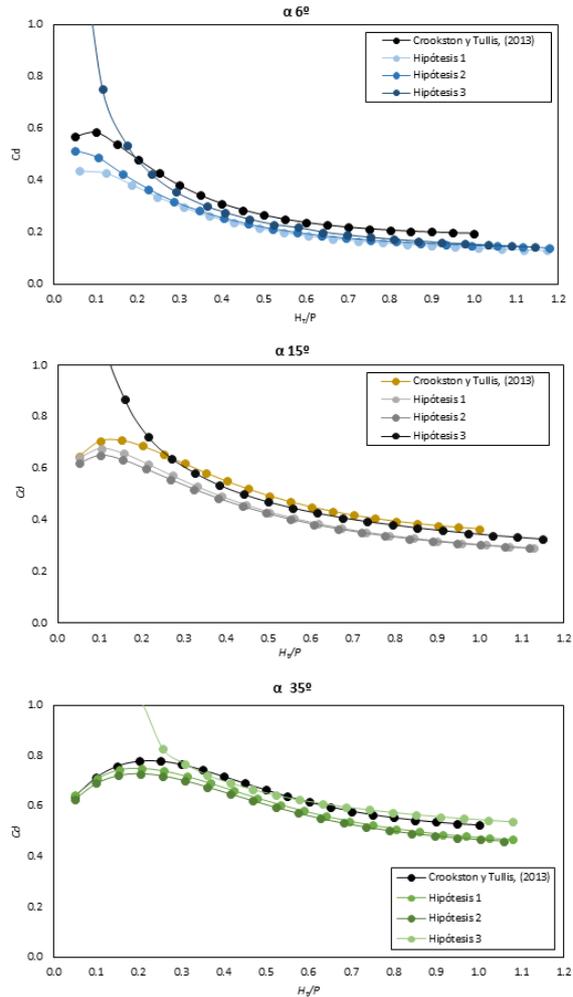


Figura 5. Comparación de resultados para vertederos tipo laberinto de distintos ángulos con cresta "half-round".

Los resultados se han comparado en términos de errores relativos con respecto a los datos experimentales (Figura 6). En general, se obtiene un buen ajuste (errores relativos inferiores al 10-20% del coeficiente de descarga) con todas las hipótesis consideradas cuando la relación $H/P > 0.2-0.3$.

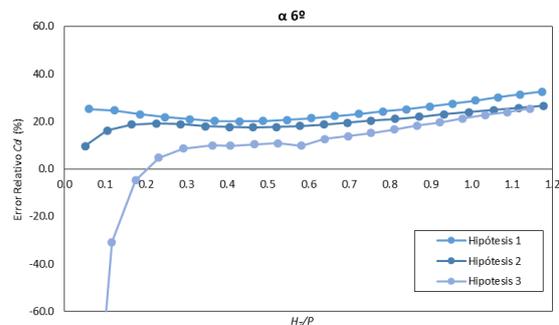


Figura 6. Errores relativos de los resultados para vertederos tipo laberinto de distintos ángulos con cresta "half-round".

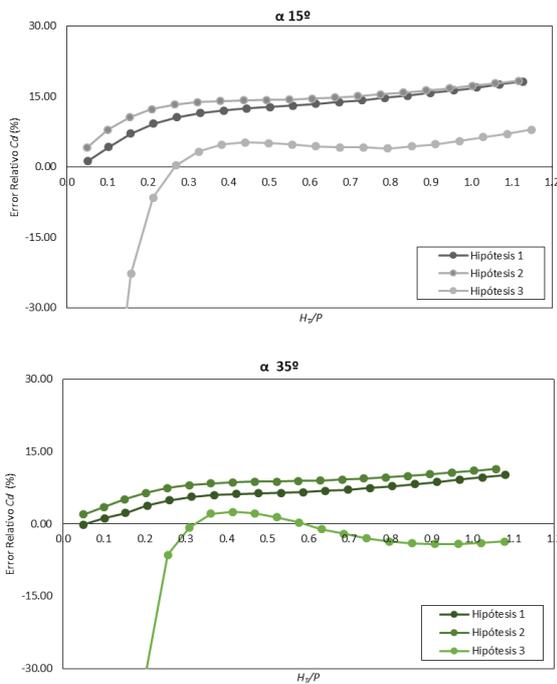


Figura 6-cont. Errores relativos de los resultados para vertederos tipo laberinto de distintos ángulos con cresta “half-round”.

4. Conclusiones

Aunque el análisis de los aliviaderos no lineales es un problema tridimensional, en este estudio en el que se emplea una metodología de simulación bidimensional, se ha encontrado un ajuste del coeficiente de descarga sobre vertederos obteniendo un error relativo en torno al 10-20% en todos los ángulos medidos para una relación H_t/P con valores entre 0.3- 1.0.

Siempre que la relación H_t/P no esté por debajo de 0.2-0.3, la hipótesis 3 obtiene coeficientes de descarga más próximos a los datos experimentales de Crookston y Tullis (2013).

Las hipótesis 1 y 2, aunque muestran un error mayor que la hipótesis 3, en rangos altos de H_t/P obtienen resultados válidos. Además, estos dos métodos permiten obtener el coeficiente de descarga para valores pequeños de H_t/P con mayor precisión.

En cuanto a la agilidad a la hora de introducir la geometría y los parámetros necesarios en el programa, la hipótesis 2 es la más sencilla y por consiguiente rápida. Para las hipótesis 1 y 3 es necesario conocer las coordenadas o vértices del vertedero tipo laberinto a simular en Iber. Desde este punto de vista, la hipótesis 3 es la más compleja al requerir introducir tridimensionalmente toda la geometría.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Fundación Séneca - Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia, en el proyecto denominado “Análisis de la capacidad de descarga de vertederos tipo laberinto y de la disipación de energía aguas abajo de los mismos”, referencia 20879/PI/18.

Los autores también agradecen las recomendaciones y sugerencias realizadas por el Dr. José M. Carrillo durante la realización del mencionado proyecto.

Referencias

- Carrillo, J.M., Matos, J., and Lopes, R. (2019). “Numerical modeling of free and submerged labyrinth weir flow for a large sidewall angle.” *Environmental Fluid Mechanics*. DOI: 10.1007/s10652-019-09701-0.
- Crookston, B.M. (2010) “Labyrinth weirs.” *Ph.D. Thesis*, Utah State University, Logan, UT, USA
- Crookston, B.M., and Tullis, B.P. (2013). “Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs II: nappe aeration, instability, and vibration.” *J. Irrig. Drain Eng.*, 139(5):371-377.
- Lopes, R., Matos, J., and Melo, J.F. (2009) “Discharge capacity for free-flow and submerged labyrinth weirs.” *Proceeding 33rd IAHR congress: water engineering for a sustainable environment*, Vancouver, Canada.
- Ministerio de Fomento Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2012). *Manual básico del usuario IBER*.
- Ros-Casajús, M. (2019). “Evaluación de la capacidad de un programa bidimensional para analizar el funcionamiento de vertederos no lineales tipo laberinto.” *Master Thesis*. E.T.S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Universidad Politécnica de Cartagena, Spain.
- Salazar, F., Mauro, J.S., Oñate, E., and Toledo, M. (2015). “CFD analysis of flow pattern in labyrinth weirs.” *Dam Protections against Overtopping and Accidental Leakage - Proceedings of the 1st International Seminar on Dam Protections Against Overtopping and Accidental Leakage*, Madrid, Spain.
- Savage, B.M., Crookston, B. M., and Paxson, G. S. (2016). “Physical and numerical modeling of large headwater ratios for a 15° labyrinth spillway.” *J. Hydraul. Eng.*, 142(11):04016046.
- Schleiss, A.J. (2011). “From Labyrinth to Piano Key weirs—a historical review.” *Proceedings of the International conference on Labyrinth and Piano Key Weirs*, Liege, Belgium.
- Tullis, B., Young, J., and Chandler, M. (2007) “Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs.” *J. Hydraul Eng* 133(3):248–254.

Tratamiento de imágenes para la adquisición de perfiles de agua y sedimento en laboratorio

Image processing for water and sediment contours acquisition in the laboratory

(Recepción 11/03/2020; Aceptación 08/06/2020)

Toapaxi, J.A.^{1,2}; Guillén, S.G.¹; Carrillo, J.M.¹; Castillo, L.G.¹

¹Hidr@m Group, Dpto. Ingeniería Minera y Civil, Universidad Politécnica de Cartagena, España

²Dpto. Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Teléfono: +34 968 17 77 00

Email: sebastian.guillen@upct.es

Resumen. La adquisición de datos en laboratorio constituye una etapa indispensable en la experimentación y análisis de fenómenos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos. Este artículo presenta la metodología para adquirir las coordenadas de los perfiles de agua y sedimento en un canal hidrodinámico, para lo cual, se ha considerado: lavado de sedimentos flushing, filmación lateral del ensayo y procesamiento de imágenes. Para validar el método se ha empleado sensores de profundidad instalados a lo largo del canal. Los resultados muestran que esta metodología tiene una buena aproximación en la medición de evolución de los perfiles de agua y sedimento.

Palabras clave. agua, flushing, imagen, perfil, sedimento.

Abstract. The acquisition data in the laboratory is an indispensable step in the experimentation and analysis of hydrodynamic and sediment transport phenomena. This article presents the methodology for acquiring the coordinates of water and sediment contours in a hydrodynamic channel, for which the following have been considered: flushing of sediments, lateral filming of the test and image processing. To validate the method, depth sensors installed along the channel have been used. The results show that this methodology has a good approximation in measuring the evolution of water and sediment profiles.

Keywords. water, flushing, image, contour, sediment.

1. Introducción

El lavado de sedimentos o flushing forma parte de una gestión óptima para evacuar los sedimentos de los embalses. Otras técnicas de lavado, como la limpieza total, es un trabajo laborioso y extenso que involucra el uso de maquinaria pesada para remover el material acumulado, con el consiguiente costo económico (Torres, et al., 2019).

En los últimos años, ha tenido gran desarrollo la aplicación de técnicas no intrusivas para medir las variables del flujo de agua, una de ellas consiste en la medición de profundidades utilizando la grabación de videos y el posterior tratamiento de imágenes.

El presente documento tiene como finalidad dar a conocer el proceso para la adquisición de coordenadas de los perfiles agua y sedimento, considerando un orden de magnitud en metros, para varios instantes de tiempo, cada 0.02 s. Trabajos precedentes han desarrollado técnicas de medición por medio del tratamiento de imágenes, sin embargo, la longitud de medición ha sido del orden de centímetros. La presencia de manchas, reflejos o una iluminación incorrecta pueden dar como resultado medidas erróneas por lo que es recomendable que se cuiden estos aspectos antes de tomar la fotografía (Jiménez, 2006).

2. Metodología

2.1. Instalación experimental

La instalación experimental consiste de un canal rectangular de 12 m de largo, 0.30 m de ancho y 0.45 m de alto. Las paredes del canal son de vidrio colocados en paneles de 1 m de longitud. El efecto de lavado de evacuación de sedimentos flushing, se genera por medio de una compuerta giratoria instalada aguas abajo del canal.

Los dos paneles del canal sujetos al análisis y que suman un total de 2.30 metros de longitud, están equipados con: 8 lámparas de iluminación para fotografía (colocados en la parte superior del canal); 6 sensores ultrasónicos para medir el nivel de agua (ubicados a 0.09, 0.24, 0.49, 0.84, 1.29 y 2.19 m) y cuya abscisa cero se ubica en el cierre de la compuerta giratoria; y dos cámaras de video DSLR Nikon D5600, equipadas con objetivos de distancia focal de 35 mm (ubicadas paralelas y niveladas a 2.5 m del canal). La Fig. 1 muestra un esquema de la configuración experimental.

2.2. Configuración y sincronización

Para obtener los contornos de agua y de sedimento resulta determinante la configuración de las cámaras.

El arreglo óptimo permite obtener los perfiles correctamente representados en espacio y tiempo, sin interferencia de la luz externa, reduciendo la mayor cantidad de reflejos y sin ocasionar que la iluminación artificial penetre en la cama de sedimento. Luego de ensayar con varias combinaciones los parámetros de las cámaras, se calibran como se indica a continuación: grabación a 50 fotografías por segundo, con una velocidad de obturación de 1/1000 s, ISO 800, exposición de -5.0, fluorescente, apertura de 5.0 y resolución de 1920 de ancho por 1080 de alto de fotograma.

En lo referente a la sincronización, las cámaras son conectadas a un ordenador y por medio del programa “digiCamControl” y una subrutina en el programa MATLAB, versión R2019b, se controla el inicio y el final de la filmación del video.

En lo que respecta a los limnómetros ultrasónicos, estos miden la superficie de agua a 1 Hz de frecuencia.

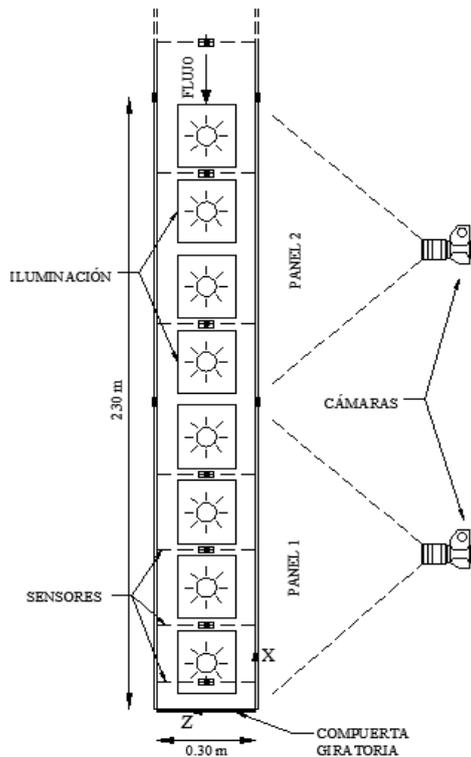


Figura 1. Instalación experimental, vista en planta.

2.3. Procedimiento experimental

Han sido realizados alrededor de 10 ensayos con diferentes combinaciones de calados de agua y sedimento, considerando una longitud de canal de 9.30 m y pendiente igual a cero. El lecho de sedimento, compuesto de arena con $D_{50} = 0.7$ mm, ha sido ubicado en la salida del canal en una longitud de 3 metros. En el ensayo representativo mostrado en este documento, el espesor de sedimentos es de 10 cm y el calado de agua de 20 cm.

Una vez nivelada la cama de sedimentos, se ubican y conectan los sensores ultrasónicos y la iluminación a lo largo del tramo de análisis. Posteriormente, se inicia el llenado del canal hasta el nivel indicado con un caudal de 2 l/s.

Luego de alcanzar el nivel y apagar la bomba, se conectan las cámaras y sensores al ordenador, y se inicia la grabación. A continuación, se abre la compuerta giratoria en un intervalo de tiempo de 0.06 s aproximadamente. La grabación es finalizada cuando el perfil de agua alcanza el perfil de sedimento, en promedio del orden de 1 min.

Para el escalamiento de las imágenes se ejecuta un segundo video con una configuración automática de las cámaras donde se pueda divisar y ubicar puntos de control referenciados en el origen y al final de cada panel. Luego, se mide in situ las dimensiones reales y se obtienen las coordenadas inferior izquierda y superior derecha de cada tramo.

2.4. Procesamientos de Imágenes

El procesamiento inicia con el recorte y la verificación de la escala de las imágenes obtenidas en el video del ensayo, en función de las coordenadas de los puntos de referencia obtenidas en el segundo video, las medidas reales tomadas en el laboratorio y la cuantificación de los tamaños de pixel para el eje “x” el eje “y”, calculados según la Ecuación 1.

$$tp = 10 \times \frac{Lr}{C_{max} - C_{min}} \quad (1)$$

Donde, tp es el tamaño de pixel en mm, Lr es la longitud real en cm, C_{max} y C_{min} son las coordenadas máxima y mínima en pixeles, respectivamente.

La Tabla 1 muestra la verificación de la escala, donde se muestra que el tamaño de pixel es prácticamente el mismo para los dos ejes y de los dos tramos.

Tabla 1. Verificación de escala en los ejes “x” y “y”.

		Coordenadas [pixel]		Lr [cm]	tp [mm]
		Inferior izquierda	Superior derecha		
Panel 1	x	222	1426	106.6	0.885
	y	693	379	27.8	0.885
Panel 2	x	243	1617	121.6	0.885
	y	687	373	27.8	0.885

Las imágenes han sido procesadas mediante el script escrito en MATLAB “Water_Sediment_JT_v1.m”, desarrollado a partir de los módulos y comandos contenidos en la sección “Image Processing Toolbox”, la cual, proporciona un conjunto completo de algoritmos estándar de referencia y aplicaciones de flujo de trabajo para el procesamiento de imágenes (MathWorks, 2020). Para obtener los contornos se lista y describen en los siguientes pasos principales:

- 1) Convertir la imagen RGB a escala de grises mediante el comando “rgb2gray”.
- 2) Ejecutar la binarización de la imagen reduciendo la información a una matriz conformada por 0 y 1, mediante el comando “imbinarize”.

- 3) Filtrar los objetos pequeños de la imagen, por medio del comando “bwareopen”. En este paso, el umbral de eliminación se configura en función de un factor que representa el número de píxeles máximo, bajo el cual los elementos serán eliminados. Por su naturaleza, este parámetro tiene un amplio rango de variación y ha sido sujeto a calibración, considerando un valor promedio de 1000 píxeles.
- 4) Identificar el perímetro del contorno en función de la conectividad del pixel, aplicando la herramienta “bwperim”. En este análisis se ha usado un valor de 8, siendo la máxima conectividad que puede tener un pixel. Esta condición es importante al considerar la variación significativa de la lámina de agua y la formación de ondulaciones debido a las formas de fondo que ocurren en los primeros instantes del lavado flushing.
- 5) Generar la matriz de información en función del número de conexiones identificadas, por medio del comando “bwlabel”.
- 6) Filtrar los valores de ordenadas máximas para el contorno de agua y ordenadas mínimas para el contorno de sedimento.

3. Resultados y validación

En la validación del método se ha tomado como referencia 3 instantes de tiempo a 0 s, 5 s y 45 s. Se ha comparado, las profundidades agua y sedimento obtenidos mediante el análisis de imágenes, con las profundidades medidas con los sensores ultrasónicos en el caso del agua y las obtenidas mediante escala graduada para el nivel de sedimentos, este último únicamente al instante inicial y final del ensayo. En la Fig. 2 se muestra los resultados obtenidos.

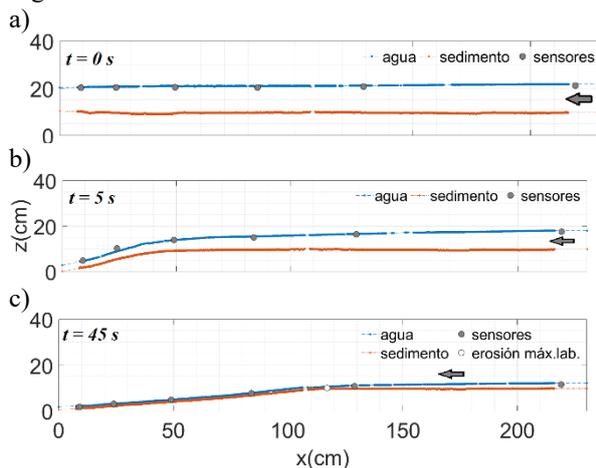


Figura 2. Perfiles de agua y sedimento, a) 0 s, b) 5 s y c) 45 s.

En la figura anterior, para el instante de tiempo de 5 s, se observa que en los dos sensores más próximos a la compuerta (primer panel), se presenta valores superiores de niveles de agua, esto se debe a que en esa zona y lapso de tiempo, el flujo es altamente turbulento y se genera burbujas de aire que se transportan por la superficie del agua, captado por el sensor; lo cual no representa el calado predominante a lo ancho del canal, alzando errores en promedio de

hasta 4.7%. Por otro lado, entre la abscisa 100 a 230 (segundo panel), el error es menor a 2.0%.

En general, comparando los datos obtenidos mediante los sensores y mediante la fotogrametría, se identifica que no existe una variación significativa, siendo el error relativo promedio inferior al 4%.

Finalmente, respecto al valor de abscisa de erosión máxima, existe un error porcentual menor de 5% entre los valores obtenidos con la medición convencional y la imagen.

4. Conclusiones

La obtención de las coordenadas de los perfiles de agua y sedimento mediante video y el análisis fotogramétrico, constituyen una alternativa válida en ensayos donde existe variación significativa de las variables geométricas en un periodo de tiempo relativamente corto, del orden de centésimas de segundo.

Cuando se presentan particularidades durante del ensayo, sean sombras, burbujas, reflejos o iluminación excesiva de elementos anexos, existen varios comandos que permiten modificar la intensidad de las imágenes, tales como: “imadjust”, “histeq”, “adaphisteq”. En búsqueda de pulir las imágenes, estas subrutinas pueden ser combinadas con otros métodos de detección de contornos que presenta el MATLAB, como “sobel” o “canny”. No obstante, con la finalidad de generalizar la metodología para la duración del ensayo, es recomendable prestar especial atención a actividades más relevantes, como por ejemplo: uniformización de las condiciones de luz, posicionamiento de cámaras, limpieza del canal y eliminación de elementos reflectantes.

Agradecimientos

Este estudio es parte del proyecto EFISED (20403/SF/17) financiando por la Fundación Séneca de la Región de Murcia (España).

El primer autor agradece a la Escuela Politécnica Nacional (Ecuador) y la Fundación Carolina (España) por la ayuda financiera recibida para sus estudios de doctorado.

Referencias

Jiménez, P. (2006). “Estudio sobre estabilidad de traviesas y lechos de escollera con transporte sólido” *Tesina*. Universidad Politécnica de Catalunya, España.

MathWorks (2020). <https://in.mathworks.com/help/images/> (Recuperado: 06/03/2020).

Torres, O., Barrera, P., García, M. (2019) “An operational sediment flushing scheme for the Ocaña hydropower plant regulation reservoir in Ecuador” *Proceedings of the 38th IAHR World Congress*, Ciudad de Panamá, Panamá, pp. 83-94.