

Editores  
Luis José Balairón Pérez  
David López Gómez

**ACTIVIDAD EXPERIMENTAL DE I+D+i EN  
INGENIERÍA HIDRÁULICA EN ESPAÑA.  
RED DE LABORATORIOS DE HIDRÁULICA  
DE ESPAÑA. SEMINARIO 2016**

**EDITORIAL  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**



Primera edición, 2016

© Editores

Luis José Balairón Pérez

David López Gómez

© de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València  
[www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es)

© Todos los nombres comerciales, marcas o signos distintivos de cualquier clase contenidos en la obra están protegidos por la Ley

© de las fotografías: el autor

Imprime: Byprint Percom sl.

ISBN: En trámite

Impreso bajo demanda

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

Impreso en España





Actividad experimental de I+D+i  
en ingeniería hidráulica en España

#### **SEMINARIO 2016. COMUNICACIONES DE LAS LÍNEAS PRIORITARIAS**

- A. CRITERIOS HIDROMORFOLÓGICOS PARA LA RESTAURACIÓN DE ESPACIOS FLUVIALES.**
- B. HIDRODINÁMICA DE EMBALSES. GESTIÓN SOSTENIBLE DE EMBALSES.**
- C. RIESGO ASOCIADO A LA ESCORRENTÍA URBANA.**
- D. SEGURIDAD DE PRESAS. ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS.**

Madrid, 28 de junio de 2016

Editores

Luis José Balairón Pérez

David López Gómez



## PRESENTACIÓN

El presente libro recoge los resúmenes de las comunicaciones presentadas al Seminario organizado por la **Red de Laboratorios de Hidráulica de España** (RLHE) el día 28 de junio de 2016 en la Universidad Politécnica de Cartagena.

Estos Seminarios son la principal actividad de la RLHE, la cual se constituyó en el año 2008 como un foro encuentro entre los principales Centros de Investigación en materia de ingeniería hidráulica experimental de España (el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y las Universidades de Castilla La Mancha UCLM, A Coruña UDC, Politécnica de Cataluña UPC, Politécnica de Cartagena UPCT, Politécnica de Madrid UPM y Politécnica de Valencia UPV).

La celebración de estos Seminarios constituye una iniciativa ya consolidada, pues se han celebrado ininterrumpidamente desde el año 2009 un total de nueve encuentros, en concreto los siguientes:

- 2009 Barcelona, Grupo Flumen, Universidad Politécnica de Cataluña, UPC
- 2009 Madrid, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX
- 2010 Valencia, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente IIAMA, Universidad Politécnica de Valencia UPV
- 2011 Madrid, Universidad Politécnica de Madrid UPM
- 2012 Madrid, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX
- 2013 Madrid, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX
- 2014 Madrid, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX
- 2015 A Coruña, Grupo de investigación Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente GIAMA, Universidad de A Coruña UDC
- 2016 Cartagena, Grupo Hidr@m Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medioambiental Universidad Politécnica de Cartagena UPCT

La presente publicación da continuidad a las que se editaron en los años anteriores con los resúmenes de cada uno de los Seminarios.

Luis Balairón Pérez

Coordinador de la Red de Laboratorios  
de Hidráulica de España, RLHE



## ÍNDICE

### Resúmenes Línea Prioritaria A

#### Criterios hidromorfológicos para la restauración de espacios fluviales

ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS COHESIVOS EN TUBERÍAS SOBRE UNA PLATAFORMA DE ENSAYOS CON AGUA RESIDUAL URBANA ( <i>Manuel A. Regueiro, Juan Naves, Jose Anta, Joaquín Suárez, Jerónimo Puertas</i> ).....	7
ANÁLISIS EXPERIMENTAL EN LABORATORIO DEL ARRASTRE DE SÓLIDOS EN UN PROTOTIPO DE SECCIÓN VIARIA ( <i>Juan Naves, Zurab Jikia, Jose Anta, Jerónimo Puertas, Joaquín Suárez, Manuel Regueiro</i> ).....	11
COEFICIENTE DE DESCARGA EN SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE FONDO ( <i>Luis G. Castillo, Juan T. García, José M. Carrillo</i> ).....	15
ESTUDIO DE LA EROSIÓN LOCAL EN PUENTES. TÉCNICAS DE CORRELACIÓN FOTOGAMÉTRICA PARA LA TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES ( <i>Beatriz Nácher, Javier Rodríguez, Ángel Balaguer, Francisco J. Vallés</i> ) .....	19
RESPUESTA DEL ECOSISTEMA RIPARIO AL HYDROPEAKING. METODOLOGÍA PARA CUANTIFICACIÓN Y RESTAURACIÓN ( <i>Álvaro Sordo, María Dolores Bejarano, Andrea Villar, Jaime García</i> ).....	23

### Resúmenes Línea Prioritaria C

#### Riesgo asociado a la escorrentía urbana

METODOLOGÍA DE BASE EXPERIMENTAL PARA OBTENER EL UMBRAL DE ESTABILIDAD DE CUALQUIER VEHÍCULO EXPUESTO A UNA INUNDACIÓN ( <i>Eduardo Martínez, Manuel Gómez, Beniamino Russo</i> ) .....	29
ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL TRANSPORTE DE DILUCIONES SALINAS DE ALTA CONCENTRACIÓN EN TUBOS A PRESIÓN ( <i>Arnau Triadú, Martí Sánchez, Antoni Andreu</i> ).....	33

## Resúmenes Línea Prioritaria D

### Seguridad de presas. Aspectos hidrológicos e hidráulicos

INFLUENCIA DE LA AIREACIÓN EN LAS PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN RÁPIDAS. PROYECTO LS-EMULSION ( <i>Juan José Rebollo, David López, Rubén Díaz</i> ).....	39
MODELACIÓN HÍBRIDA DEL ALIVIADERO EN POZO DE LA PRESA DE NAGORE ( <i>David López, Tamara Ramos, Rubén Díaz</i> ).....	45
MEDIDA DE NIVELES Y VELOCIDADES MEDIANTE EL RECONOCIMIENTO DE IMÁGENES CON ILUMINACIÓN LÁSER DE BAJA INTENSIDAD ( <i>Martí Sánchez, Eric Marteles</i> ).....	49
UNA HERRAMIENTA BASADA EN HEC-HMS PARA REALIZAR PREDICCIONES DE CRECIDAS EN TIEMPO REAL ( <i>Dorota Nowicz, Luis Altarejos, Antonio Viguera</i> ).....	53
ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CUENCOS DE DISIPACIÓN TIPO LYAPIN ( <i>Rocío López, Antonio Viguera, Luis G. Castillo, José M. Carrillo</i> ).....	57
ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE LA SOCAVACIÓN AGUAS ABAJO DE LA PRESA TOACHI ( <i>Luis G. Castillo, José M. Carrillo</i> ).....	61
ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE VELOCIDADES EN CUENCOS DE VERTIDO LIBRE ( <i>Luis G. Castillo, José M. Carrillo</i> ).....	65
COMPARACIÓN DE CÓDIGOS CFD EN EL MODELADO DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS ( <i>Arnau Bayón, Juan Francisco Macián, Francisco J. Vallés, Petra Amparo López</i> ).....	69

**LÍNEA PRIORITARIA A**

**CRITERIOS HIDROMORFOLÓGICOS PARA LA RESTAURACIÓN DE  
ESPACIOS FLUVIALES**



## **Acumulación de sedimentos cohesivos en tuberías sobre una plataforma de ensayos con agua residual urbana**

**Manuel A. Regueiro, Juan Naves, Jose Anta, Joaquín Suárez, Jerónimo Puertas**

***Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente - GEAMA, Universidade da Coruña***

La acumulación de sedimentos en sistemas de saneamiento unitarios es una fuente de contaminación debida tanto a las velocidades de autolimpieza insuficientes en conducciones que se producen durante períodos de tiempo seco como a los sólidos depositados tras importantes episodios de lluvias. Los principales efectos derivados de la acumulación de materia orgánica en las conducciones son la producción de gases (sulfhídrico y metano), que se generan por procesos anaerobios dentro del manto de sedimentos, y las importantes concentraciones de contaminantes en los Desbordamientos de los Sistemas Unitarios (DSU), en gran parte provocadas por la resuspensión debida al cambio de régimen hidráulico que se produce en las conducciones durante los aguaceros. Para estudiar este fenómeno de acumulación en conducciones se dispone de una plataforma de ensayos en la EDAR de Bens de la ciudad de A Coruña (600.000 habitantes equivalentes) que es capaz de tomar el agua residual bruta o bombearla tras el sistema de tamizado de la planta (figura 1a). La principal característica de esta plataforma es la posibilidad de estudiar los fenómenos asociados a las cargas de sólidos cohesivos del agua residual bajo condiciones controladas de laboratorio.

El agua residual llega a la plataforma a través de un depósito de cabecera que actúa como dissipador de energía y se distribuye de igual forma a las tuberías a través de vertederos triangulares. Aguas abajo de las conducciones se sitúa una compuerta para ajustar la condición de calado en cada ensayo. Los ensayos de acumulación de sedimentos se han llevado a cabo sobre dos tuberías con distintas geometrías: una tubería circular (figura 1b) de PVC convencional para pequeños sistemas de saneamiento con un DN 315 mm (300 mm diámetro interno) y una tubería ovoide plástica (figura 1c) con área equivalente ( $H=385$  mm,  $R=110$  mm y  $r=55$  mm). Estos ensayos de acumulación se han realizado para diferentes pendientes (2‰ y 5‰) y

diferentes condiciones de calado aguas abajo (calado crítico y calado de 100 mm). Al comienzo de cada ensayo se ha establecido un caudal constante (3-4.5 L/s) y, de forma diaria, se ha registrado la evolución de la tensión de fondo y de la altura de sedimentos, para lo cual fue necesario vaciar las tuberías de forma que el lecho no se viese afectado.

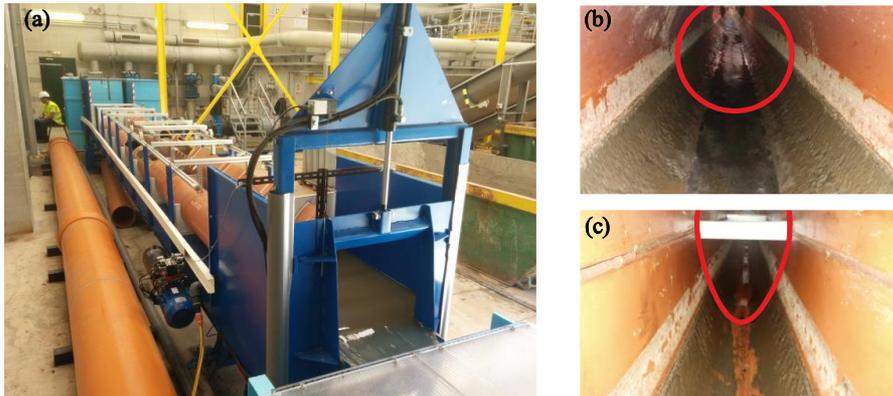


Figura 1. Vista general de la plataforma de ensayos (a) y apariencia de las tuberías circular (b) y ovoide (c) tras una semana de ensayo

Con el fin de facilitar las medidas de calados, niveles de sedimento y velocidades se han abierto varias ventanas en la parte superior de las tuberías. Cinco sondas de ultrasonidos se han dispuesto a lo largo de cada una de las tuberías para registrar, con una precisión de  $\pm 0.13$  mm, los calados y las alturas del sedimento una vez vaciadas. Además se han abierto dos secciones de control, abarcando una zona de estudio de 2 m, en el centro de cada una de las tuberías. En estas secciones de control se han medido diariamente perfiles de velocidad en la sección central de cada tubería y, además, se han registrado los sedimentos de fondo con una técnica de imágenes (figura 2a). Esta técnica de medición del lecho de sedimentos a través del procesado de imágenes digitales se considera no intrusiva al no verse afectado la estructura del lecho y, a su vez, permite obtener el perfil de sedimentos (figura 2b) en diferentes secciones (6 secciones/tubería).

Durante estos ensayos también se ha monitorizado, a través de distintas sondas, los parámetros de turbidez, conductividad y materia orgánica del agua residual a la entrada de la plataforma. Las señales registradas por las sondas se han ajustado a través de muestras puntuales obtenidas con un tomamuestras automático. Se ha observado un patrón diario y de fin de

semana de los parámetros estudiados, por lo que la carga diaria de contaminantes se considera constante a lo largo de cada uno de los ensayos.

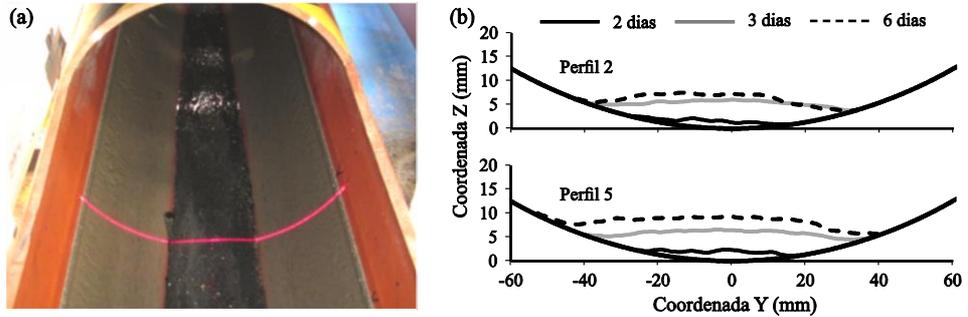


Figura 2. Técnica de medición del perfil de sedimentos a través de imágenes (a) y evolución del perfil de sedimentos en dos secciones de la tubería circular (b)

En todos los ensayos realizados con condiciones de calado crítico no se ha registrado ningún tipo de depósito en el fondo, mientras que en los casos con calado fijo aguas abajo (100 mm) únicamente se ha medido acumulación en la sección circular. En estos ensayos la tubería ovoide ha presentado mayores tensiones de fondo, relacionadas directamente con el arrastre de sólidos. Durante el tiempo de los ensayos (7-11 días), la acumulación en la tubería circular ha presentado un crecimiento lineal (entre 1.4 y 3.8 mm/día) y, además, se ha observado un desarrollo de biopelículas en las paredes en ambas tuberías. Al final de cada ensayo se han tomado muestras para poder caracterizar tanto del lecho de sedimentos ( $\rho=1460 \text{ kg/m}^3$ ,  $d_{50}=202 \text{ }\mu\text{m}$ ) como las biopelículas ( $\rho=1190 \text{ kg/m}^3$ ,  $d_{50}=76 \text{ }\mu\text{m}$ ).

### Agradecimientos.

Este trabajo ha sido financiado a través del proyecto “SEDUNIT: Análisis de los procesos de acumulación, erosión y transporte de sedimentos cohesivos en sistemas de saneamiento unitario” – Referencia CGL2015-69094-R (MINECO/FEDER, UE). El trabajo de investigación de Juan Naves ha sido financiado por la beca FPU14/01778. Los autores también agradecen la colaboración de Montse Recarey en el desarrollo del trabajo experimental.



## **Análisis experimental en laboratorio del arrastre de sólidos en un prototipo de sección viaria**

**Juan Naves, Zurab Jikia, Jose Anta, Jerónimo Puertas, Joaquín Suárez, Manuel Regueiro**

***Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente - GEAMA, Universidade da Coruña***

Agentes contaminantes procedentes del tráfico, tareas de mantenimiento y deposiciones atmosféricas se acumulan en las superficies impermeables de carreteras y zonas urbanizadas durante el tiempo seco. Cuando comienza la precipitación, parte de estos contaminantes son lavados y transportados por la red de drenaje hasta el medio receptor. Comprender este fenómeno de lavado y transporte es esencial para estimar las características del flujo en el punto de vertido y mejorar técnicas de tratamiento que minimicen su impacto en el medio receptor. En este trabajo se presentan una serie de experimentos en los que se mide en laboratorio el proceso de lavado de los sedimentos en superficie y su posterior transporte en suspensión a través de la red de colectores hasta el punto de vertido.

La campaña experimental se ha llevado a cabo en un modelo físico a escala real de un segmento de calle situado en el laboratorio de hidráulica del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC). Esta instalación consiste en un tramo de calle con pavimento de hormigón que se conecta a una red de colectores a través de tres arquetas (figura 1). La lluvia es generada mediante cuatro difusores situados 2 m sobre la superficie de la calle.

Para simular la carga contaminante en superficie se ha utilizado un polvo no cohesivo de origen industrial con un tamaño máximo de 200  $\mu\text{m}$ . La ventaja de utilizar este sedimento es su insolubilidad, asegurando que el transporte sea totalmente en suspensión y permitiendo un mayor control sobre el caudal sólido y los balances de masas. Los ensayos consisten en disponer sobre la superficie diferentes cargas y distribuciones de sedimento y simular una lluvia constante de 101 mm/h de intensidad durante 5 minutos. En el punto de vertido de la red de colectores se mide el caudal y la turbidez de manera continua. Al mismo tiempo se toman muestras de 280 ml de forma manual para determinar el caudal sólido a partir del análisis de los sólidos en suspensión totales (SST). No todo el sedimento se lava y se arrastra hasta el

final de la red de drenaje, quedando depositado en la misma superficie de la calle, en las arquetas y en la red de tuberías. Este sedimento se mide también con el objetivo de cerrar el balance de masas y comprobar así la fiabilidad de los resultados.



Figura 1. Sección viaria y red de drenaje (arriba) y ejemplo de distribución del sedimento en superficie (abajo)

A partir de las concentraciones de SST obtenidas al filtrar las muestras manuales se calibra la señal de turbidez, dando como resultado una medida en continuo del caudal sólido en el punto de vertido. En la figura 2 se presentan dos ejemplos de resultados experimentales para distintas distribuciones y cargas de sedimento en superficie. Se puede ver como en ambos casos se da un buen ajuste entre medidas. Estos resultados se consideran muy apropiados para la calibración y validación de módulos de transporte de sedimentos en

modelos numéricos de drenaje urbano como el desarrollado en Fraga et al. (2015).

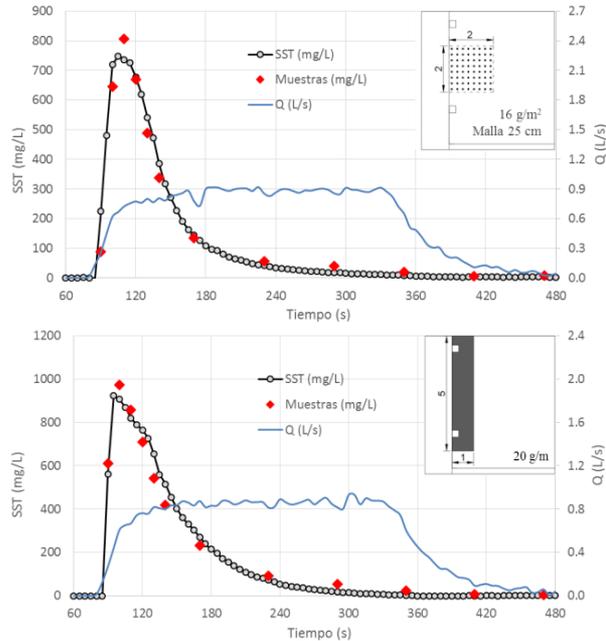


Figura 2. Concentración de sólidos en suspensión totales (círculos negros representan las medidas calculadas a partir de la señal de turbidez y los rombos rojos las muestras tomadas manualmente) y caudal en el punto de vertido de la red de drenaje para dos distribuciones de sedimento en superficie diferentes

### Agradecimientos.

Este trabajo ha sido financiado parcialmente a través del proyecto “SEDUNIT: Análisis de los procesos de acumulación, erosión y transporte de sedimentos cohesivos en sistemas de saneamiento unitario” – Referencia CGL2015-69094-R (MINECO/FEDER, UE). El primer autor ha sido financiado por la beca de doctorado FPU14/01778.

### Referencias bibliográficas.

Fraga I., Cea L. Puertas J. (2015). Validation of a 1D-2D dual drainage model under unsteady part-full and surcharged sewer conditions, *Urban Water Journal*, 1-11.



## Coeficiente de descarga en sistemas de captación de fondo

Luis G. Castillo, Juan T. García, José M. Carrillo

**Grupo I+D+i Hidr@m. Universidad Politécnica de Cartagena. UPCT**

El caudal captado por unidad de longitud de una reja de fondo se puede expresar mediante la denominada ecuación del orificio [1]. A partir de medidas en laboratorio se puede obtener el valor del coeficiente de descarga,  $C_{qH}$ , producto del factor de contracción del flujo,  $C_c$ , y del factor que considera la no uniformidad de la velocidad y presión en la captación,  $C_v$ .

$$\frac{dq}{dx} = C_c C_v m \sqrt{2g(H_0 + x \operatorname{sen}\theta)} \approx C_{qH} m \sqrt{2g(H_0 + x \operatorname{sen}\theta)}$$

[1]

Donde  $dq/dx$  es el caudal específico captado por unidad de longitud;  $H_0$  es la energía disponible al inicio de la reja; y  $(H_0 + x \operatorname{sen}\theta)$  es la carga de energía disponible en cada coordenada longitudinal  $x$  a lo largo de la reja.

La definición de dicho parámetro permite ajustar el diseño un sistema de captación de fondo. En el laboratorio de hidráulica de la UPCT se dispone de una infraestructura que posee diversas rejillas de fondo con barras longitudinales y sección en T: longitud 0.9 m; ancho 0.5 m; índices de huecos,  $m = 0.16$ ; 0.22 y 0.28; y dimensiones de las barras 0.03 m de ala y 0.03 m de alma. Las rejillas pueden adoptar diversas pendientes desde la horizontal hasta el 33%; y la capacidad de bombeo alcanza los 200 l/s/m. Se han medido los caudales derivados en tramos de 0.05 m de longitud de reja considerando cinco valores de caudal distintos y cinco pendientes longitudinales. A partir de éstos se deduce el valor de  $C_{qH}$ , que se representa en la figura 1 respecto al valor  $x/h_c$ , donde  $h_c$  es el calado crítico para cada caudal.

En la figura 1 se observa la variabilidad del coeficiente de descarga a lo largo de la reja, tendiendo a disminuir conforme avanzamos hacia aguas abajo; así como la disminución del mismo conforme aumenta la pendiente longitudinal adoptada por la reja (Nosedá 1956, Righetti y Lanzoni 2008). En el laboratorio de Hidráulica de la UPCT se ha propuesto un ajuste del coeficiente de descarga contemplando los diversos índices de huecos,  $m = 0.16 - 0.28$ , así

como las pendientes longitudinales adoptadas por la reja,  $\tan\theta= 0 - 33\%$  (ecuación [2]).

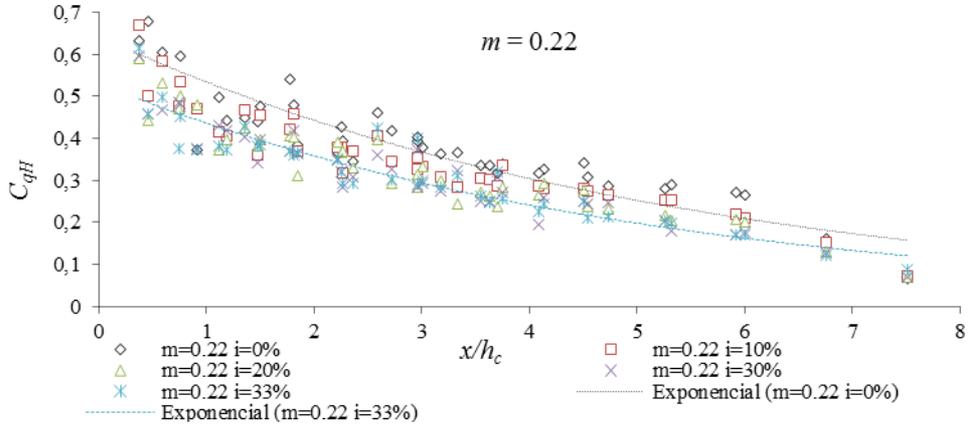


Figura 1. Valores de  $C_{qH}$  medidos para el caso de la reja con  $m = 0.22$

$$C_{qH} \approx \frac{0.58e^{-0.75\left(\frac{x}{h_c}m\right)}}{(1+0.9\tan\theta)} \quad [2]$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de inclinación longitudinal de la reja.

En la figura 2 se presenta el caudal captado a lo largo de la reja medido en laboratorio y simulado numéricamente mediante la ecuación [3] de flujo espacialmente variado con caudales decrecientes en la que intervienen las ecuaciones [1] y [2].

$$\frac{dh}{dx} = \frac{2mC_{qH}\sqrt{(H_0+x\text{sen}\theta)(H_0+x\text{sen}\theta-h\text{cos}\theta)}+h\text{sen}\theta}{3h\text{cos}\theta-2(H_0+x\text{sen}\theta)} \quad [3]$$

Donde  $h$  es la altura de la lámina de agua, medida perpendicularmente al plano de la reja, y a lo largo de la coordenada  $x$ .

La ecuación [3] se resuelve mediante el método de Runge- Kutta de orden 4 para incrementos de  $x$  de 0.05 m y conocidos los valores de calado y energía al inicio de la reja,  $h_0$  y  $H_0$  respectivamente.

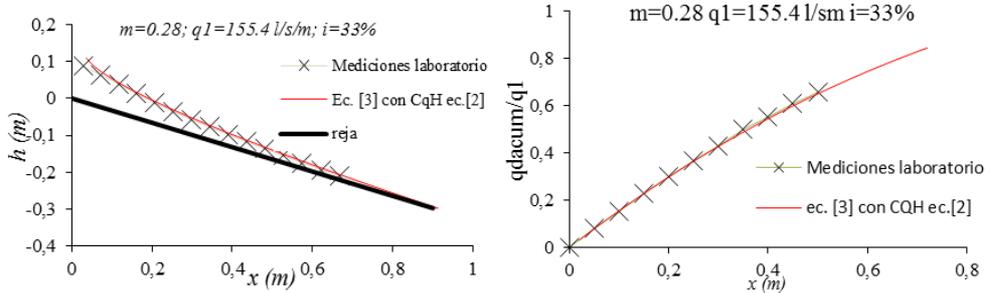


Figura 2. Perfil de la lámina y caudal captado acumulado medido y simulado según ecuación [3] para el caso de  $m = 0.28$ , caudal,  $q_1 = 155.4 \text{ l/s/m}$

El coeficiente de descarga en los sistemas de captación de fondo depende de diversas variables como el tipo de barras que forman las rejillas; el espaciamiento entre ellas; las condiciones de aproximación del flujo así como la pendiente longitudinal de la rejilla, principalmente. De los distintos trabajos experimentales recogidos en la bibliografía se han deducido una serie de coeficientes de descarga equivalentes, constante a lo largo de toda la rejilla, y que permitan definir la longitud total de rejilla mojada mediante una ecuación como la [1]. Dichos valores se recogen en la figura 3.

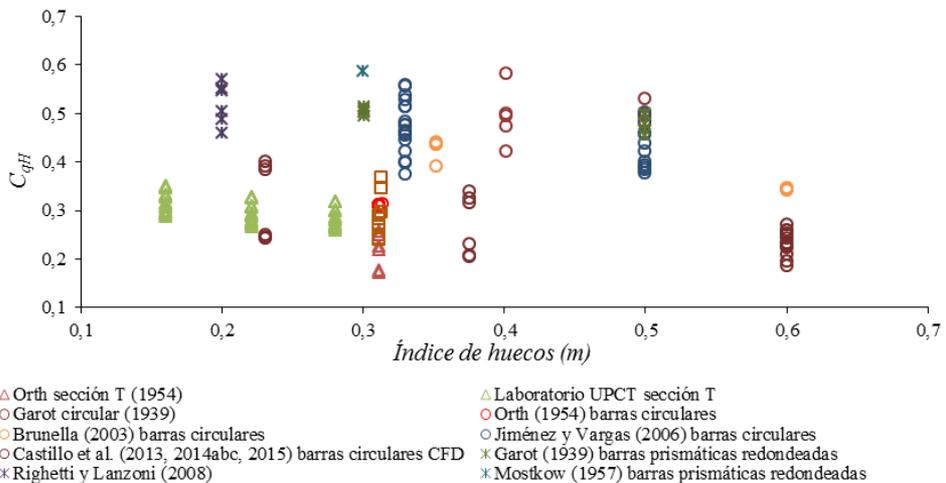


Figura 3. Valores de  $C_{qH}$  obtenidos de la bibliografía a partir de la ecuación [1]

A partir de estos valores se propone realizar un ajuste que posibilite la obtención de un valor de  $C_{qH}$  equivalente para la definición de diversos parámetros como la longitud de rejilla mojada.



## **Estudio de la erosión local en puentes. Técnicas de correlación fotogramétrica para la toma de datos experimentales**

**Beatriz Nácher<sup>(1)</sup>, Javier Rodríguez<sup>(2)</sup>, Ángel Balaguer<sup>(2)</sup>, Francisco J. Vallés<sup>(1)</sup>**

*<sup>(1)</sup> Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València*

*<sup>(2)</sup> Departamento de Matemática Aplicada. Universitat Politècnica de València*

En el marco del proyecto “*Desarrollo de esquemas numéricos de alto orden y su validación mediante contraste experimental para analizar el transporte de sedimentos en puentes fluviales con lecho protegido*”, se están desarrollando en el Laboratorio de Hidráulica y Obras Hidráulicas de la UPV una serie de ensayos sobre canal de lecho móvil (figura 1), con el fin de obtener suficientes datos experimentales para una correcta calibración de un modelo de flujo y transporte de sedimentos, que resuelve las ecuaciones de Saint Venant en 2D, y que ya ha sido validado para casos 1D (Nácher et al., 2016).

La campaña experimental, diseñada en el marco de una tesis doctoral, sin efectos de escala para la extrapolación de resultados a escala real, contempla la realización de un gran número de ensayos en los que la deformación del lecho de arena (erosiones y deposiciones) debe ser medida tanto durante la realización de los ensayos, como al finalizar estos (situación de equilibrio).

Para la toma de datos a lo largo y ancho de toda la superficie de estudio, se recurre al uso de técnicas de correlación fotogramétrica, que permiten obtener MDTs del canal de ensayos. Así, se amplían las posibilidades de tratamiento de datos, respecto de las técnicas tradicionales de medición con limnómetro de aguja (que únicamente permite medir en puntos concretos del modelo).

Actualmente, se ha conseguido restituir el lecho en la situación de equilibrio, al finalizar el ensayo y, posteriormente, drenar el canal, de manera que la lámina de agua no genere distorsión en las imágenes tomadas con la cámara fotográfica. De esta manera, pueden obtenerse resultados con precisión milimétrica (figura 2).

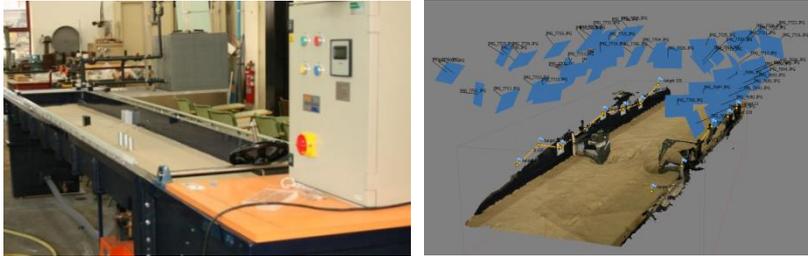


Figura 1. Canal de lecho móvil (izda) y posición de las fotografías realizadas (dcha)

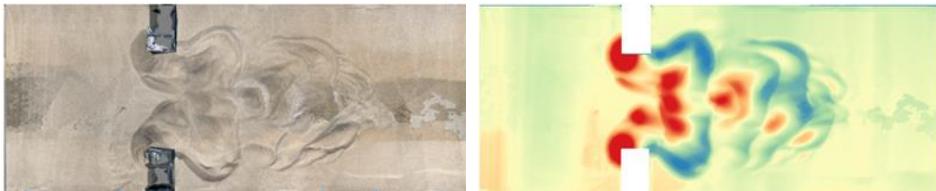


Figura 2. Restitución fotogramétrica de la zona de ensayos (izda). Modelo digital del mismo (dcha)

Los trabajos están ahora enfocados a obtener resultados similares durante el proceso, es decir, cuando existe una lámina de agua en movimiento por encima del lecho a restituir. Para ello se contempla, por una parte, repetir el proceso de correlación fotogramétrica e intentar escalar los resultados obtenidos (claramente distorsionados por encontrarse el lecho bajo la superficie de agua). Las pruebas realizadas en este sentido han resultado esperanzadoras, por cuanto es posible obtener un modelo restituído de las erosiones y deposiciones en el canal, pero todavía se está trabajando en la posibilidad de escalar los resultados, que no se corresponden con los medidos con limnómetro.

Por otra, también se está investigando en el empleo de métodos de restitución con láser – escáner, para lo que sería necesario disponer de una luz láser (con una geometría a determinar), dos cámaras de video de alta resolución, y la programación de los algoritmos correspondientes para la corrección de los efectos provocados por la refracción del haz a través del agua. Esta técnica puede arrojar resultados muy satisfactorios, como se desprende de los estudios descritos en Stancanelli et al. (2011).

Este trabajo está financiado por la Conselleria de Educación, Investigación, Cultura y Deporte de la Generalitat Valenciana, en el marco de las ayudas para grupos de investigación consolidables AICO/2015 y del programa VALi+d para personal investigador en carácter predoctoral.

**Referencias.**

B. Náchero-rodríguez, F.J. Vallés-morán, A. Balaguer-Beser, M.T. Capilla (2015). Numerical-experimental modelling of local scouring downstream of protected bridges in alluvial river beds. 36th IAHR World Congress. The Hague. ISBN: 978-90-824846-0-1.

Stancanelli, L. M., Musumeci, R. E., Marini, A., Foti, E., Rabionet, I. C., & Arcilla, A. S. (2011). Optical techniques for measuring swash zone morphodynamics. Coastal Eng Proceedings,1(32),33.



## Respuesta del ecosistema ripario al Hydropeaking. Metodología para cuantificación y restauración

**Álvaro Sordo<sup>(1)</sup>, María Dolores Bejarano<sup>(2)</sup>, Andrea Villar<sup>(1)</sup>, Jaime García<sup>(1)</sup>**

*<sup>(1)</sup>Universidad Politécnica de Madrid, España*

*<sup>(2)</sup>Umea University, Suecia*

El objetivo de este estudio es proponer metodologías y guías que permitan armonizar la producción hidroeléctrica y la sustentabilidad del ecosistema fluvial. Aunque la energía hidroeléctrica se considera una fuente limpia y renovable, también causa importantes impactos ambientales (Renöfält et al. 2010). La alteración del régimen de caudales en los ríos resultante de la operación de la presa para la generación de energía (denominada en algunos casos con el término hydropeaking, figura 1; Zimmerman et al. 2010) afecta a los procesos ecológicos y compromete su funcionamiento natural. Desafortunadamente los estudios científicos en la materia son escasos.

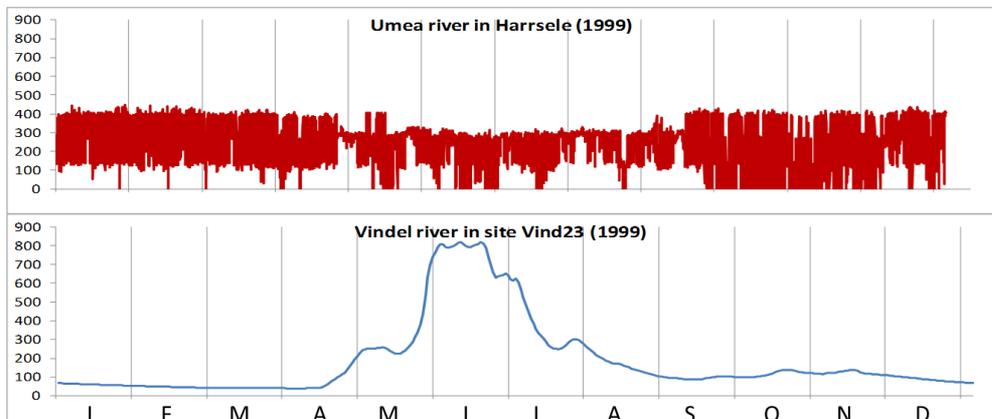


Figura 1. Comparación de un régimen anual de caudales afectado por “hydropeaking” (arriba) y un régimen de caudales natural (abajo). El caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) está en el eje y, y los meses en el eje x

Este estudio propone métricas hidrológicas y ecológicas para evaluar cuantitativamente el impacto del hydropeaking y desarrolla modelos de respuesta hydropeaking-vegetación (Poff et al. 2010) para cuantificar el impacto ecológico esperado resultado de diferentes escenarios de operación de las centrales hidroeléctricas. El estudio propone además guías para el manejo sustentable de las centrales hidroeléctricas considerando los impactos ecológicos y los impactos económicos debido a restricciones en las consignas óptimas de generación de energía (figura 2).

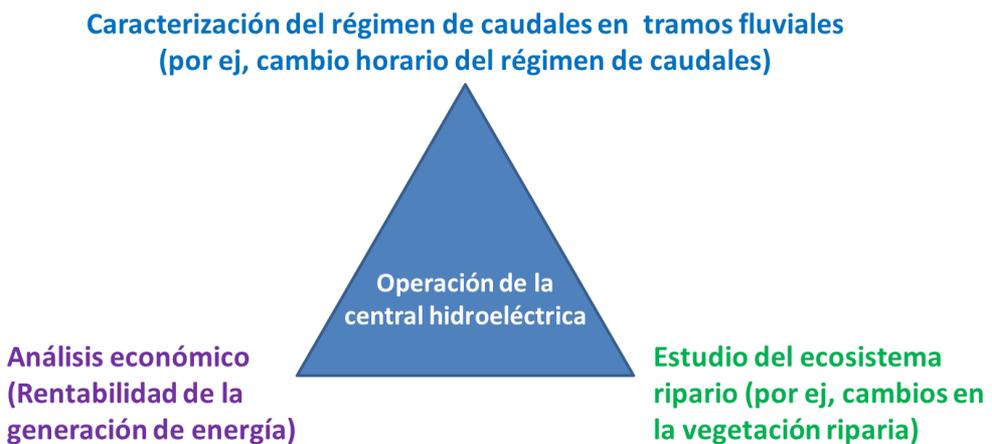


Figura 2. Esquema metodológico propuesto

Para alcanzar los objetivos mencionados, se está realizando una extensa revisión bibliográfica, análisis de series n-minutales de caudales en ríos con impacto y ríos naturales utilizados como referencia, campañas de campo (figura 3) y experimentos en invernadero (figura 4) para evaluar la germinación, crecimiento, supervivencia y estado de salud (Stella et al. 2011; Bejarano et al. 2012) de 13 especies vegetales y se están desarrollando modelos matemáticos predictivos. El caso de estudio consta de 5 tramos de ríos en el norte de Suecia con 11 parcelas experimentales (Bejarano y Sordo-Ward 2011). Este estudio se enmarca dentro del proyecto europeo RiPeak financiado por la Intra-European Fellowships bajo el FP7 People-Marie Curie Actions.



Figura 3. Campañas de campo e instrumentación en 11 parcelas experimentales ubicadas al norte de Suecia (ríos Ume y Vindel)

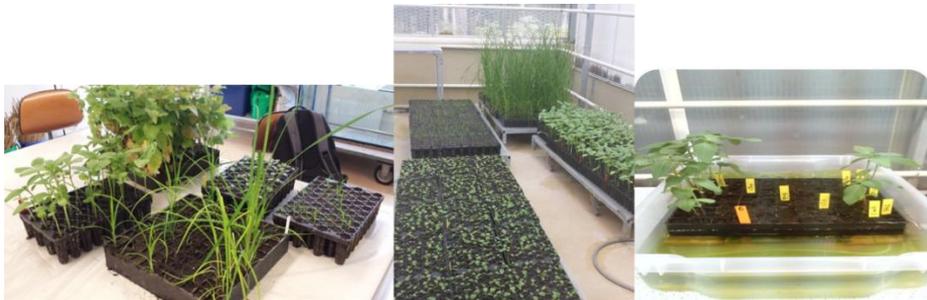


Figura 4. Trabajos en invernadero con 13 especies vegetales en diferentes estadios de desarrollo

## Referencias.

Bejarano, M.D., González del Tánago, M., García de Jalón, D., Marchamalo, M., Sordo-Ward, A., Solana-Gutiérrez, J. 2012. Responses of riparian guilds to flow alterations in a Mediterranean stream. *J. of Vegetation Science*, 23, 443-458.

Bejarano, M. D., & Sordo-Ward, A. 2011. Riparian woodland encroachment following flow regulation: a comparative study of Mediterranean and Boreal streams. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, (402), 20.

Poff, N.L., Richter, B.D., Arthington, A.H. et al., 2010. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 55, 147-170.

Renöfält, B.M., Jansson, R., Nilsson, C. 2010. Effects of hydropower generation and opportunities for environmental flow management in Swedish riverine ecosystems. *Freshwater Biology*, 55, 49-67.

Stella, J.C., Battles, J.J., McBride, J.R., Orr, B.K. 2011. Riparian Seedling Mortality from Simulated Water Table Recession, and the Design of Sustainable Flow Regimes on Regulated Rivers *Restoration Ecology*, 18, 284-294.

Zimmerman, J.K.H., Letcher, B.H., Nislow, K.H., Lutz, K.A., Magilligan, F.J. 2010. Determining the effects of dams on subdaily variation in river flows at a whole-basin scale. *River Research and Applications*, 26, 1246-1260.

**LÍNEA PRIORITARIA C**  
**RIESGO ASOCIADO A LA ESCORRENTÍA URBANA**



## **Metodología de base experimental para obtener el umbral de estabilidad de cualquier vehículo expuesto a una inundación**

**Eduardo Martínez<sup>(1)</sup>, Manuel Gómez<sup>1)</sup>, Beniamino Russo<sup>(2)</sup>**

***(1) Instituto FLUMEN – UPC***

***(2) Grupo de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GIHA) – EUPLA***

### **Introducción y Objetivos.**

Los vehículos son componentes que hoy en día están muy presentes en las ciudades y, aunque desde el punto de vista medioambiental existen muchas discusiones al respecto, parece que la tendencia en número de vehículos es ascendente. Por tanto, éstos son parte imprescindible a considerar cuando se dan inundaciones en las ciudades y merecen el análisis de la peligrosidad a la que se ven sometidos en dichas inundaciones. Se trata de elementos cuya peligrosidad se determina con el estudio del inicio de pérdida de estabilidad, ya sea por flotación, deslizamiento o vuelco. Es posible entender por tanto a los vehículos como grandes escombros arrastrados por el agua que pueden representar cuantiosos daños económicos y suponer graves consecuencias para la seguridad de las personas. La estabilidad de los vehículos, quedará comprometida cuando las variables hidráulicas, calado y velocidad, superen un cierto umbral. Estas variables ya fueron tenidas en cuenta ( $y$ ,  $v$ ,  $v \cdot y$ ) para determinar la estabilidad de los peatones y, en este caso, se considerarán igualmente pero relacionándolas con las características de los vehículos.

Se trata por tanto de componentes de la ciudad que requieren ser estudiados desde el punto de vista de su estabilidad cuando se ven sometidos a una corriente de agua. Los estudios requeridos deben ofrecer soluciones lo más generalistas posibles que puedan garantizar límites de seguridad para cualquier tipo de vehículo, ya sea actual o más antiguo.

En ninguno de los estudios experimentales sobre estabilidad de vehículos llevados a cabo hasta el momento se han ensayado más de dos o tres modelos de vehículos a escala reducida, con lo que no es posible desarrollar una metodología general aplicable para cualquier vehículo real. El criterio australiano propuesto en la Guía AR&R (2011) ha sido el criterio más idóneo hasta el momento para garantizar la estabilidad de los vehículos, agrupados en

tres tipologías: coches pequeños, coches grandes y vehículos todoterreno. Dicho criterio ha sido actualizado y validado en este trabajo de acuerdo con resultados de estudios posteriores. Sin embargo, el criterio australiano no es suficientemente flexible para considerar cualquier vehículo con diferentes características. En este sentido era necesario llevar a cabo una completa y rigurosa campaña experimental ensayando una gran variedad de vehículos con el objetivo de obtener una metodología general para definir la zona estable en el dominio calado-velocidad para cualquier tipo de vehículo.

### Resultados y Metodología propuesta.

En la campaña experimental llevada a cabo se han ensayado doce modelos de vehículos a escala reducida y, en base al análisis de los resultados, se propone una metodología para obtener el umbral de estabilidad para cualquier vehículo real expuesto a una inundación. Los ensayos fueron realizados con tres escalas diferentes (1:14, 1:18 y 1:24), en los que se incluían además el análisis de flotación y de rozamiento, los cuales hacen que el presente estudio sea el más completo hasta el momento. Los resultados de cada vehículos fueron ajustados a curvas  $(v \cdot y) = a_0$ , obteniendo un valor de la constante  $a_0$  diferente para cada vehículo (figura 1).

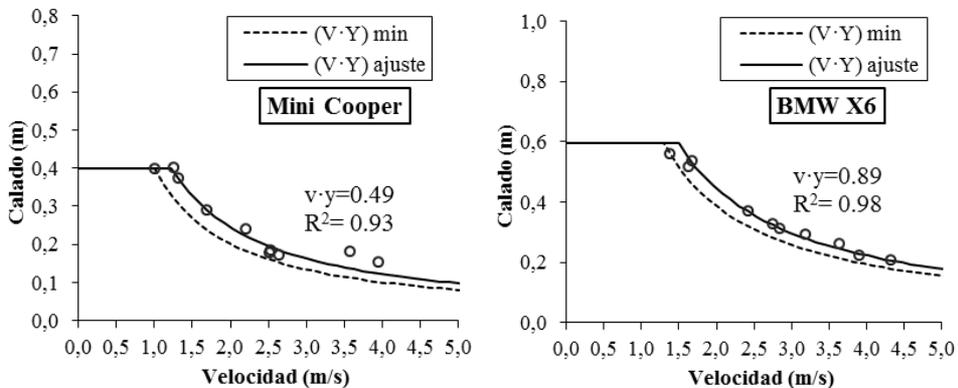


Figura 1. Resultados obtenidos para los modelos Mini Cooper y BMW X6

La metodología que se propone permite definir una zona estable en el dominio calado-velocidad con la suficiente precisión para cualquier vehículo real. Se ha observado que los parámetros más determinantes para la estabilidad de un

vehículo expuesto a una inundación son: el área en planta (PA), su peso ( $M_c$ ), la altura libre entre el suelo y el chasis (GC) y el coeficiente de rozamiento entre el suelo y los neumáticos ( $\mu$ ). Agrupando estas variables físicas, las cuales son fácilmente accesibles en las fichas técnicas para cualquier vehículo, se propone el coeficiente de estabilidad modificado ( $SC_{mod}$ ) aplicable para cualquier vehículo según la expresión [1].

$$SC_{mod} = \frac{GC \cdot M_c}{PA} \cdot \mu \quad [1].$$

Es posible obtener una relación lineal entre el coeficiente de estabilidad ( $SC_{mod}$ ) y la constante de ajuste ( $a_0$ ) de la función  $(v \cdot y) = a_0$  de cada vehículo ensayado. De esta manera se puede obtener el coeficiente de estabilidad modificado para un vehículo cualquiera y entrando en la función  $(v \cdot y) = f(SC_{mod})$  obtener el umbral de estabilidad de un vehículo. Dada la incertidumbre del coeficiente de rozamiento ( $\mu$ ), se propone la obtención de dos límites: mínimo y máximo, utilizando los valores de  $\mu=0.25$  y  $\mu=0.75$  respectivamente. Tales valores definen el rango de coeficientes de rozamiento en carreteras mojadas propuesto por Gerard (2006). Estos dos umbrales definirán una zona de incertidumbre entre ellos y se asegura la estabilidad para condiciones hidrodinámicas por debajo del umbral mínimo.

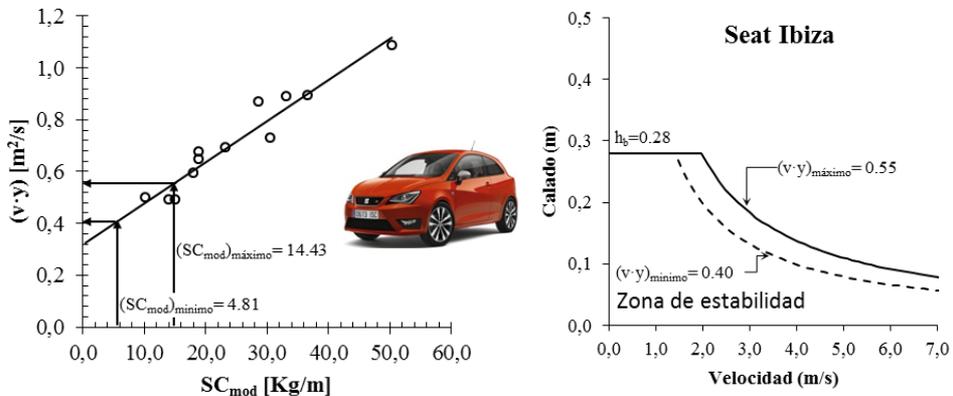


Figura 2 . Ajuste lineal para la relación  $SC_{mod}$  frente a  $(v \cdot y) = a_0$  y aplicación práctica al Seat Ibiza

Con esta metodología se proporciona una herramienta que puede ser utilizada por los responsables en la toma de decisiones en el campo de la gestión del riesgo de inundaciones en zonas urbanas, definiendo un coche de diseño y obteniendo su correspondiente umbral de estabilidad.

**Referencias.**

Gerard, M. (2006). Tire-road friction estimation using slip-based observers. Department of Automatic Control. Lund Institute of Technology. Tesis de Master. Lund, Suecia. 68p.

Shand, T. D., Cox, R. J., Blacka, M. J., Smith, G. P. (2011). Australian Rainfall and Runoff (AR&R). Revision Project 10: Appropriate Safety Criteria for Vehicles (Report Number: P10/S2/020). Sídney, Australia.

## **Estudio de la dinámica del transporte de diluciones salinas de alta concentración en tubos a presión**

**Arnau Triadú<sup>(1,2)</sup>, Martí Sánchez<sup>1)</sup>, Antoni Andreu<sup>(2)</sup>**

*(1) Instituto FLUMEN. Escuela de Caminos de Barcelona. UPC-BarcelonaTECH*

*(2) Aigües de Barcelona*

### **Antecedentes y objetivos.**

La cuenca minera de sal de la comarca del Bages (Catalunya), situada entre Cardona, Súria, Sallent y Balsareny, es el yacimiento más importante de Europa y desde el año 1923 que se explota para extraer potasa. Esta explotación generó en poco tiempo un problema de salinización excesiva del agua del río Llobregat. Alrededor de los años 30 del siglo pasado ya se reclamaba la construcción de una tubería que canalizara los residuos generados en las minas (principalmente cloruros de sodio) hasta el mar para evitar que se vertieran en el río.

Esta tubería no se hizo realidad hasta el año 1983, cuando se construyó el Colector de Salmueras. Este colector es propiedad de la Agencia Catalana del Agua (ACA) y actualmente lo explota bajo concesión la UTE Colector de Salmorres, participada mayoritariamente por la empresa AGBAR (grupo Suez). Tiene una longitud superior a los 100 km y diámetros que van desde los 125 a los 1200 mm. El tiempo de permanencia de la salmuera entre Cardona y el mar es de unas 24 horas.

Con el objetivo de mejorar la gestión del Colector y de aumentar el conocimiento en el transporte de salmueras a presión, AGBAR y la UPC firman en 2015 un convenio de doctorado industrial que se sustenta en tres grandes ejes:

Estudio del comportamiento hidráulico y químico de la salmuera para distintas concentraciones de sal en un medio controlado; en este caso, el laboratorio de Hidráulica de la Escuela de Caminos de Barcelona.

Monitorización de un tramo piloto del Colector de Salmueras mediante la instalación de diferentes sensores en la tubería que permitan el estudio in situ del comportamiento hidráulico del fluido circulante.

Modelación numérica del flujo a presión de la salmuera tanto desde el punto de vista hidráulico como químico, que permita la predicción de diferentes escenarios de funcionamiento.

### **Metodología.**

La instalación experimental utilizada en el laboratorio aprovecha la que se utilizó en un estudio realizado en el Instituto Flumen (Sánchez-Juny et al. 2012) por encargo de Aqualogy (grupo Suez), aunque ha sido objeto de algunas modificaciones. La figura 1 y 2 muestran la composición final del circuito. Así, se ha sustituido el depósito acumulador por un tanque frigorífico de acero inoxidable, con el objetivo de controlar la temperatura inicial de la mezcla mediante un termostato. Además, se han añadido varios puntos de control de presión y temperatura a lo largo del circuito.

En relación con la monitorización del Colector, a principios de 2016 se hizo una propuesta a la UTE para controlar un tramo piloto del prototipo. Se prevé que la instalación esté lista para empezar a recoger datos durante el mes de julio de 2016 y se ha programado el control del tramo durante un período verano-primavera.

Finalmente, se modelizará numéricamente el tramo del Colector de Salmueras del cual se obtendrán más datos. Es uno de los tramos con más dificultades de gestión, ya sea por precipitación de sales, sedimentación de partículas sólidas insolubles o por acumulación de bolsas de aire. El objetivo de la modelización de este tramo será simular el comportamiento de la salmuera en el interior de la tubería, incorporando los datos obtenidos en los ensayos llevados a cabo en el laboratorio y los datos de campo de los sensores instalados en el Colector.

No existe ningún modelo numérico que integre precipitación, sedimentación y acumulación de aire, pero sí hay que lo resuelven por separado. Este proyecto se centrará en el tema de la acumulación de aire y los cambios de régimen hidráulico asociados, mediante el uso del programa ITM (León and Oberg 2015). El estudio en relación a la precipitación de sales y la sedimentación de partículas sólidas se limitará al cálculo de los umbrales de concentración máxima de sales y de velocidad mínima del flujo para que no se produzca ninguno de los dos fenómenos. Para ello se usarán los programas PHREEQC (Parkhurst and Appelo 1999) y DHLLDV (Miedema and Ramsdell 2016), respectivamente.

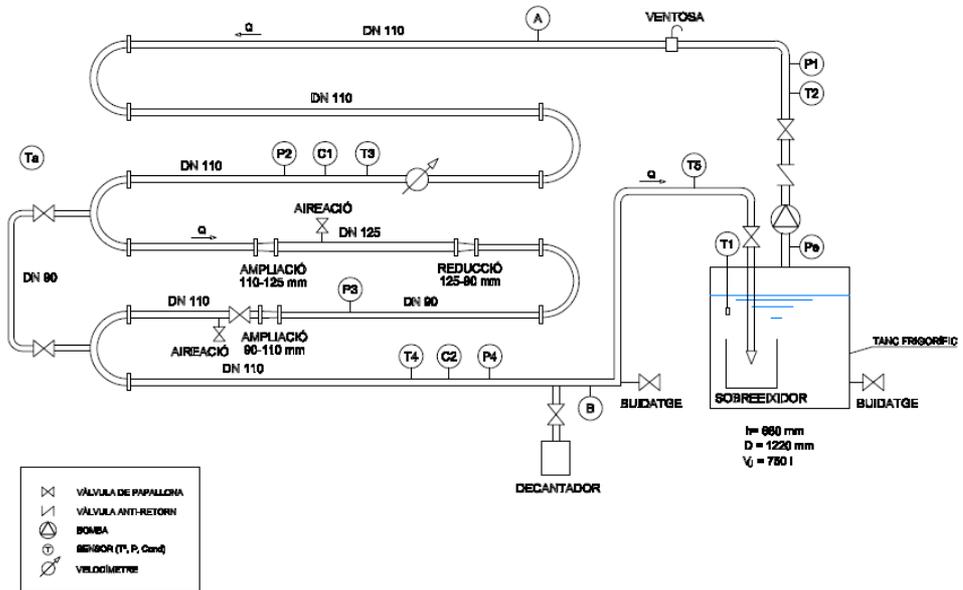


Figura 1. Esquema de la instalación experimental



Figura 2. Imagen de la instalación experimental

## Referencias.

León, Arturo S., and Nils Oberg. 2015. "Illinois Transient Model." <http://web.engr.oregonstate.edu/~leon/>.

Miedema, Sape A., and Robert C. Ramsdell. 2016. "The Delft Head Loss & Limit Deposit Velocity Framework ( DHLLDV )." WEDA Journal of Dredging 15(2).

Parkhurst, By David L, and C a J Appelo. 1999. "User's Guide To PHREEQC (Version 2) — a Computer Program for Speciation, and Inverse Geochemical Calculations." Exchange Organizational Behavior Teaching Journal D(Version 2): 326. <http://downloads.openchannelsoftware.org/PHREEQC/manual.pdf>.

Sánchez-Juny, Martí, Ernest Bladé Castellet, Daniel Niñerola Chifoni, and Juan Pomares Abad. 2012. Estudi Del Comportament de La Salmorra En L'ampliació de La Capacitat Del Col·lector de Salmorres Entre Balsareny I El Mar.

**LÍNEA PRIORITARIA D**

**SEGURIDAD DE PRESAS. ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS**



## Influencia de la aireación en las pérdidas por fricción en rápidas. Proyecto LS-Emulsion

**Juan José Rebollo, David López, Rubén Díaz**

***Laboratorio de Hidráulica. Centro de Estudios Hidrográficos. CEDEX***

El Laboratorio de Hidráulica del CEDEX está realizando actualmente una investigación sobre la influencia de la aireación en rápidas y cuencos de resalto en el marco del proyecto EMULSIONA (Plan Nacional de I+D del MINECO), cuyo objeto es analizar y caracterizar estos efectos a gran escala.

La primera fase de la investigación se ha centrado en el estudio de la influencia de la aireación en las rápidas, donde se intenta evaluar la pérdida de energía para conocer la velocidad de entrega al final de la misma y así dimensionar la estructura de disipación necesaria. Analizando el estado del arte sobre esta temática, se mencionan diferentes mecanismos que influyen en la disipación de energía en rápidas

- Frenado por fricción de contornos: Existen múltiples expresiones para cuantificar este efecto, siendo el más extendido la fórmula de Manning (1889). Esta ecuación representa la pendiente de fricción en base al coeficiente  $n$

$$I_f = \frac{n^2 Q^2}{S^2 R_h^{4/3}}$$

- Disipación turbulenta: Hinze (1949) propuso una formulación para evaluar los efectos disipativos de la aireación, ya que altera los mecanismos de disipación turbulenta. Esta formulación es teórica sin apoyo experimental
- Disipación por efecto la división y reagrupamiento de las burbujas: La diferencia de tensión tangencial en el flujo a diferentes capas produce efectos de cizallamiento que rompen las burbujas, para volver a reagruparse en zonas de choque. Durante este proceso se vence la tensión superficial de las burbujas, lo que produce una disipación de energía (paso a calor).

Los efectos de la aireación en el primer mecanismo son contrapuestos a los restantes. En el flujo en rápida, con láminas de poca entidad debido a la velocidad, parece que la fricción será preponderante, mientras que en el resalto

tiene mucho más importancia la turbulencia. En este sentido, el principal objeto de la experimentación será evaluar cuál de ellos tiene mayor influencia en cada caso.

En cuanto a la instalación experimental e instrumentación, se ha construido en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX una rápida de 6 m de altura y un cuenco de amortiguamiento de 9 m de longitud. La instalación se alimenta con un sistema de bombeo que permite alimentar un caudal de 300 l/s a través de una boquilla que permite regular el calado entre 2 y 20 cm. Esto permite disponer de velocidades en la sección de entrada entre 3 y 20 m/s. El dispositivo experimental consta además de un compresor de aire de 8 bares que permite alimentar caudales de hasta 3.000 l/min de aire.

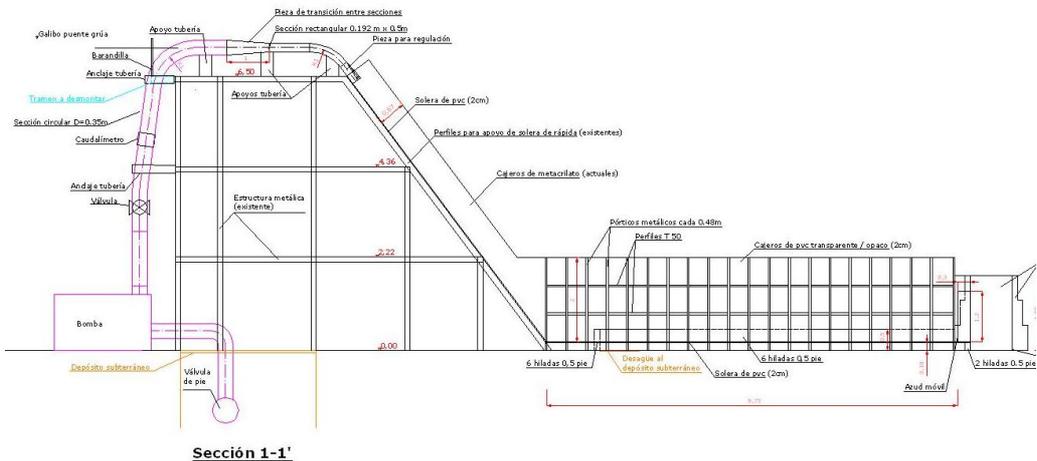


Figura 1. Esquema de la instalación experimental

Los principales equipos de medida y caracterización del flujo están formados por un tubo Pitot de fabricación propia, que toma una muestra de flujo emulsionado de forma continua y la conduce a un depósito de decantación en el que se separa y afora el caudal de aire y agua. La velocidad del flujo en la rápida se ha realizado con el mismo tubo Pitot, que se encuentra conectado a un sensor de presión que proporciona el término cinético de la altura de energía.



Figura 2. Sistema de medida de velocidad y concentración de aire

En cuanto a la fase de experimentación y análisis de resultados, se han obtenido valores de velocidad y concentración de aire a pie de rápida para una gama de ensayos de entre 155 y 300 l/s de caudal de agua y 0 y 2500 l/min de caudal de aire. Se ha podido observar y medir en la rápida que una mayor concentración de aire en el flujo se traduce en un aumento de la velocidad, en parte por la reducción de los efectos de la fricción (Mateos, 1987).

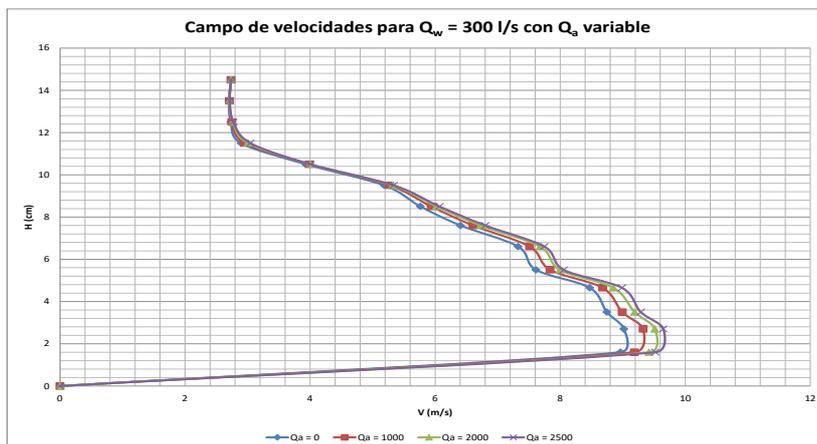


Figura 3. Campo vertical de velocidades para caudal agua 300 l/s con diferentes caudales aire

Asociado a este análisis, se ha obtenido el campo de concentraciones a lo largo de la vertical en el mismo punto, con el objeto de obtener la concentración media y poder relacionar esta variable con el número de Manning.

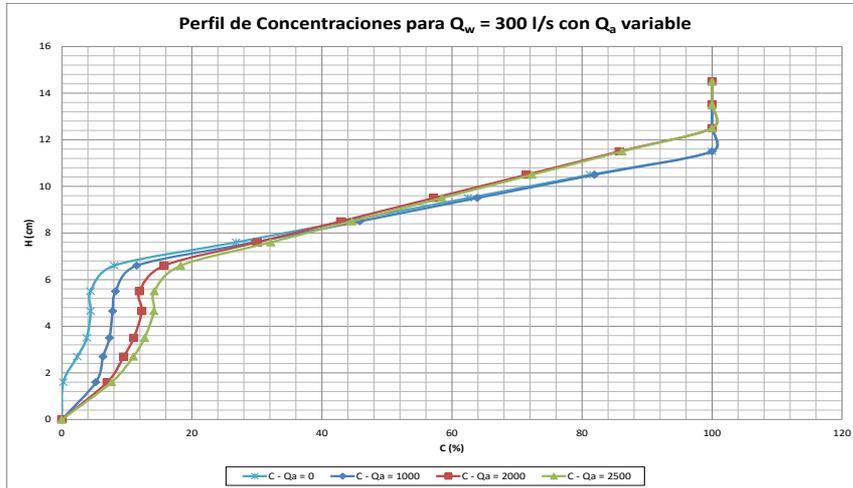


Figura 4. Campo vertical de concentraciones para caudal agua 300 l/s y diferentes caudales de aire

De manera preliminar, la aireación forzada en la rápida proporciona unas condiciones que incrementan la velocidad del fluido y genera una situación más desfavorable en la sección de inicio del resalto, en lo que a amortiguación de energía se refiere. La siguiente fase del estudio se centrará en caracterizar la ecuación que reproduzca la variación del número de Manning en función de la concentración en cada caso.

### Agradecimientos.

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto de investigación "Estudio de la aireación natural y forzada en modelo físico de grandes dimensiones y análisis de su influencia en el funcionamiento de los cuencos de resalto hidráulico (LS-EMULSION)" (BIA2011-28756-C03-03), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y por fondos FEDER de la Unión Europea.

### Referencias.

Hinze, J. O. & VAN DER HEGGE ZIJNEN, B. G. (1949). Transfer of heat and matter in the turbulent mixing zone of an axially symmetrical jet. Appl. Sci. Res. A 1, 435461.

López, D, Cuellar, V., Díaz R. (2014). Corrección termodinámica de la difusión numérica del método W-SPH. CC BY-NC-NC 2014, IWA Publishing, Editorial UPV. Ingeniería del Agua | 15.1 |2014.

Mateos C. (1987). Aireación y cavitación en Obras de desagüe. Curso sobre comportamiento hidráulico de estructuras de desagüe en presas. CEDEX.

Valero, D., Fullana, O., Gacía-Bartual R., Andrés-Domenech, I., Valles, F. (2014). Analytical formulation for the aerated hydraulic jump and physical modelling comparison. 3er IAHR Europe Congress, 2014. Porto (Portugal).

Wood, R. (1991). Air entrainment in free-surface flows. IAHR Hydraulic structures design manual. Rotterdam (Netherlands).

Gutierrez Serret, R. (1995). Aireación de estructuras hidráulicas de las presas. Premio José Torán (Comité Nacional Español de Grandes Presas). Madrid.



## Modelación híbrida del aliviadero en pozo de la presa de Nagore

**David López, Tamara Ramos, Rubén Díaz**

**Laboratorio de Hidráulica. Centro de Estudios Hidrográficos. CEDEX**

La población de Nagore, perteneciente al término municipal de Arce (Navarra), se encuentra en las proximidades de la cola de embalse de Itoiz, junto al río Urrobi. Como consecuencia de la declaración de impacto ambiental de la presa de Itoiz se ha proyectado un dique de cola que permitirá mantener los niveles de lámina en las proximidades de dicha población. En la actualidad, la Confederación Hidrográfica del Ebro está construyendo la presa de Nagore. Se trata de un dique de cola de la presa de Itoiz en el río Urrobi. Es una presa de materiales sueltos con núcleo asfáltico, coronada a la cota 592.5 msnm y longitud de coronación 622 m, con una altura máxima sobre cimientos de 32.2 m (figura 1 figura).

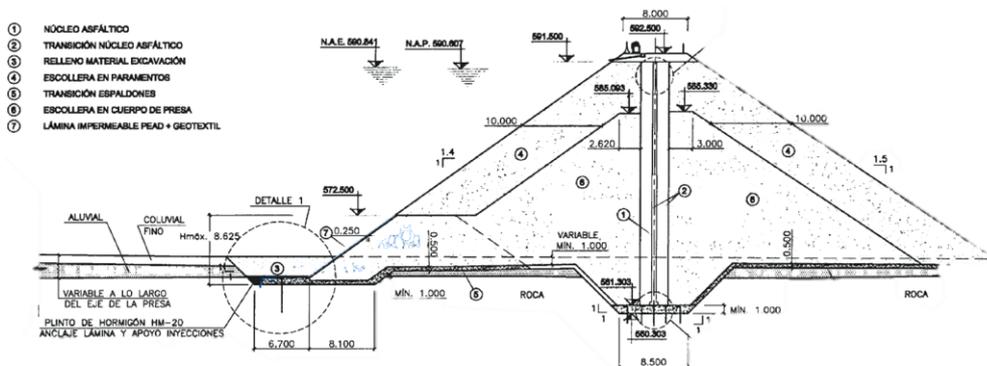


Figura 1. Esquema de la presa

El aliviadero en pozo se levanta junto al pie de aguas arriba de la presa. Forma parte de una estructura conjunta que alberga tanto los desagües de fondo como el aliviadero de superficie. Para compatibilizar ambos fines dispone de una torre adosada al pozo que permite el accionamiento de las válvulas de regulación del desagüe (figura 2 figura).

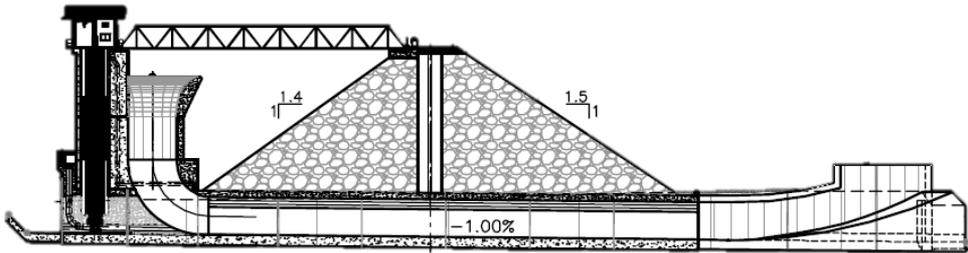


Figura 2. Esquema del aliviadero

En diciembre de 2014 el CEDEX emitió un informe técnico sobre el estudio en modelo matemático del aliviadero de Nagore. Como consecuencia de tal estudio se diseñaron una serie de mejoras en el diseño que se han estudiado mediante modelación numérica y física. La experimentación con modelación numérica se ha realizado mediante un modelo matemático tridimensional SPHERIMENTAL de partículas desarrollado por el CEDEX basado en el método SPH, con el objeto de analizar el flujo hidrodinámico de la estructura y comprobar la formación de ondas, penachos u otros fenómenos hidráulicos perjudiciales.

El modelo físico tridimensional que reproduce tanto el aliviadero como la zona de vaso que pueda condicionar el flujo de llamada, así como un tramo del cauce de aguas abajo para estudiar la restitución de los caudales. Este modelo permitió analizar fenómenos de aireación en la conducción así como diseñar la protección de escollera del cuenco de amortiguamiento.

Las técnicas de supercomputación actuales permiten emplear modelos de partículas para el estudio hidrodinámico de estructuras hidráulicas. Gracias al empleo de forma conjunta de modelación física y numérica se alcanzan mejores resultados en un plazo de tiempo considerablemente menor. Además la calibración de estos métodos matemáticos cada vez es mejor y permite analizar fenómenos más complejos.

El análisis numérico inicial de este estudio permitió validar la viabilidad del diseño hidráulico de las estructuras hidráulicas e identificar las posibles mejoras previamente a su estudio en modelo físico. La modelación física permite detectar situaciones anómalas durante transitorios difilamente detectables.

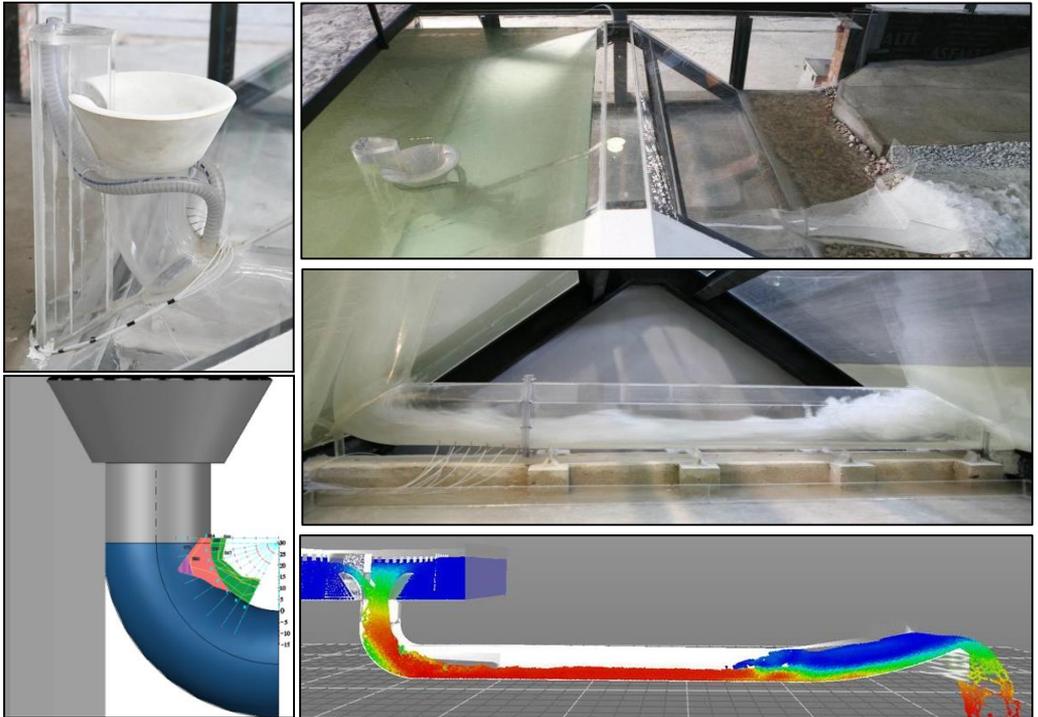


Figura 3. Modelo matemático y físico del aliviadero de Nagore

La modelación híbrida físico-numérica permite profundizar en el análisis de problemas hidrodinámicos y permite acortar plazos y costes en los modelos físicos.



# **Medida de niveles y velocidades mediante el reconocimiento de imágenes con iluminación láser de baja intensidad**

**Martí Sánchez, Eric Marteles**

***Escuela de Caminos de Barcelona. UPC-BarcelonaTECH***

## **Introducción.**

Son bien conocidas las ventajas e inconvenientes del uso, en hidráulica, de instrumentos intrusivos para las medidas de calados (limnímetros, ecosondas, sondas de resistividad eléctrica, etc) y velocidades (molinetes, ADV, etc). Asimismo, en los últimos años con las técnicas de reconocimiento de imágenes aparece una metodología no intrusiva que supone un avance en la medida de las citadas variables hidráulicas. La principal dificultad del uso de estas técnicas, estriba en conjugar las características hidráulicas del ensayo con la intensidad de iluminación y la velocidad de grabación de la cámara que se use. Por ejemplo, flujos con elevadas velocidades suelen requerir de iluminación más intensa y mayor velocidad de registro de la cámara. El uso de estas técnicas habitualmente se lleva a cabo con equipos PIV que requieren de un complejo montaje experimental (tanto por la complejidad técnica del propio equipo como por las medidas de seguridad laboral que hay que tomar) a parte del elevado coste que supone disponer de un equipo de estas características.

El presente trabajo muestra los resultados, con sus ventajas e inconvenientes, de la experiencia que se ha llevado a cabo en el laboratorio de hidráulica de la Escuela de Caminos de Barcelona, en que se ha intentado simplificar al máximo el montaje de un equipo de PIV (Cortijo, 2015; Prats, 2016; Marteles, 2016).

## **Metodología experimental.**

Se ha llevado a cabo la medida de niveles y velocidades en un flujo gradualmente variado en el canal de pendiente variable. Para ello se ha dispuesto de hasta cinco puntos de luz roja láser (figura 1 y 2) que producen un plano de iluminación. Los citados puntos de luz se han dispuesto alineados con la corriente para mejorar la intensidad de iluminación del flujo.



Figura 1. Punto de luz láser usada en la experiencia y cámara usada para la grabación de imágenes

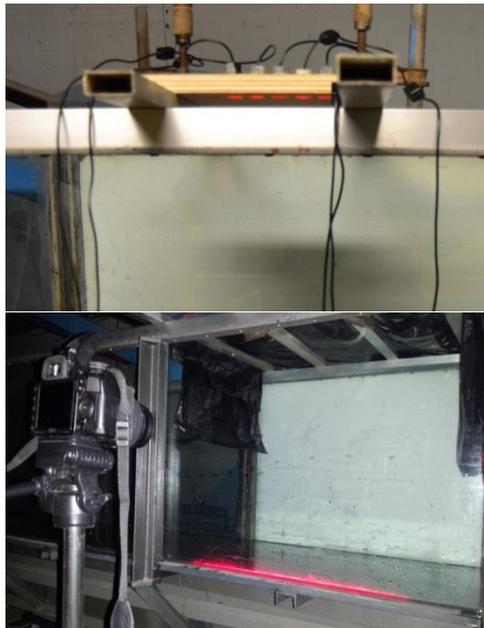


Figura 2. Instalación experimental. Detalle de la alineación de los puntos de luz láser

Los ensayos han sido registrados en video con cámaras domésticas (NIKON D3100, SAMSUNG Galaxy S4 y GoPro Hero+). A partir de este simple montaje se han registrado una serie de videos de un flujo en régimen lento que ha sido procesado para la medida de los niveles y los campos de velocidades.

## Resultados.

Se han realizado diversos ensayos, para diferentes caudales entre 36.5 l/s y 43 l/s, iluminando diferentes planos alejándose del plano de grabación. Asimismo, se han realizado ensayos sin y con el uso de trazadores (poliamida).

En la figura 3 se muestra una composición de diversas imágenes en que se aprecia la rectificación a los que hay someter la imagen en función de la distancia a la cámara del plano que se esté iluminando en el interior del flujo, por causa de la perspectiva.

Por otro lado en la figura 4 se muestra la estimación del campo de velocidades obtenida del análisis con la herramienta PIVlab de un ensayo en que usó una poliamida como trazador.

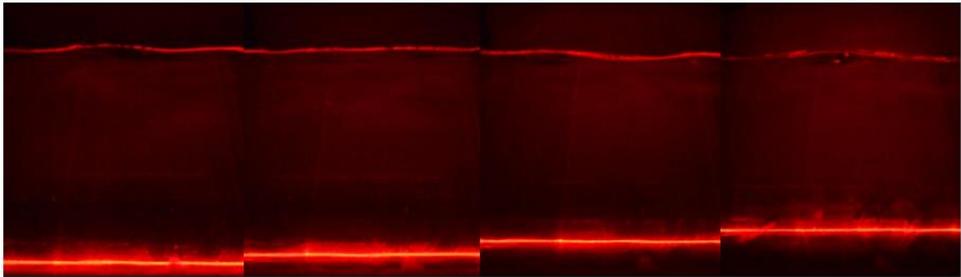


Figura 3. Análisis de las imágenes para la medida de calados. Rectificación de la perspectiva para ensayos con plano iluminado alejándose de la cámara. Ensayo 36.5l/s

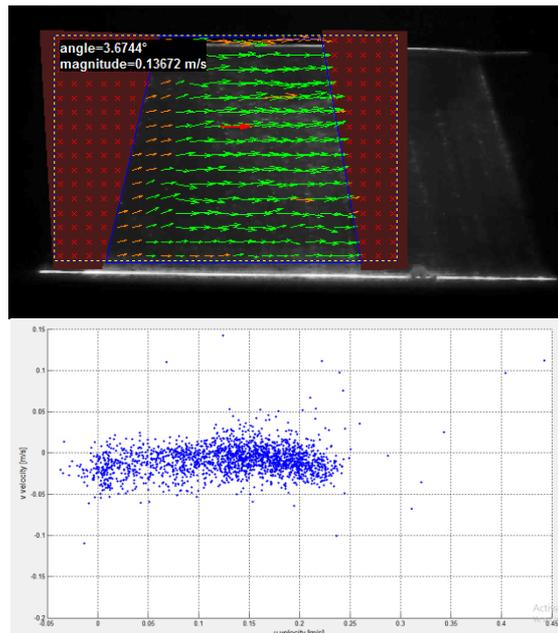


Figura 4. Distribución de las velocidades según estimación de PIVlab. Ensayo 43 l/s con uso de trazador

### **Referencias.**

Cortijo, C. 2015. "Aplicació de tècniques PIV en hidràulica experimental. Cas d'un règim ràpid en làmina lliure". Trabajo Final Estudios. Escola de Camins. UPC-BarcelonaTECH.

Marteles, E. 2016. "Aplicació de tècniques PIV de baix cost en fluxos de làmina lliure". Trabajo Final Estudios. Escola de Camins. UPC-BarcelonaTECH

Prats, A. 2016. "Aplicació de tècniques PIV en hidràulica experimental. Cas d'un règim subcrític en làmina lliure". Trabajo Final Estudios. Escola de Camins. UPC-BarcelonaTECH.

## **Una herramienta basada en HEC-HMS para realizar predicciones de crecidas en tiempo real**

**Dorota Nowicz, Luis Altarejos, Antonio Vigueras**

***Grupo I+D+i Hidr@m. Universidad Politécnica de Cartagena. UPCT***

La gestión de una crecida en una presa trata de equilibrar dos aspectos contrapuestos: por un lado, la protección del valle situado aguas abajo, mediante la retención de tanto volumen de agua como sea posible en el embalse, y, por el otro, la protección de la propia presa frente a excesivos niveles de agua que podrían provocar su rotura ocasionando una crecida catastrófica. Esta gestión, además, se hace en un contexto de incertidumbre, puesto que, en general, en ríos cortos y no regulados por otras presas aguas arriba, en el momento de realizar una toma de decisiones sobre suelta de caudales se desconoce el volumen de agua que va a entrar en el embalse en las horas siguientes. Para el tomador de decisiones de operación de una presa en crecidas, el conocer, aunque sea de forma aproximada, los volúmenes de agua y los caudales punta que se prevén en las próximas horas es una información altísimo valor, ya que se proporcionan escenarios cuantitativos que permiten adoptar una estrategia óptima de gestión de la crecida.

En el presente estudio, a partir de esta idea, se acomete el desarrollo de una herramienta basada en un modelo de simulación hidrológica que sea capaz de realizar predicciones de crecidas en tiempo real acopladas a la actualización continua de predicciones de lluvia.

El estudio está dividido en dos partes:

- La primera consiste en la confección del modelo hidrológico de la cuenca del río Guadalentín situada aguas arriba de la presa de Puentes (figura 1), con un área de drenaje de 1424,7 km<sup>2</sup>, y su calibración. El modelo de cuenca se ha preparado usando ArcGIS, Arc Hydro Tools y HEC-GeoHMS. Las simulaciones se han realizado con el HEC-HMS.
- La segunda parte ha sido la creación de una herramienta de creación dinámica de simulaciones en modo continuo, basada en el modelo HEC-HMS, y que utiliza diversas herramientas de manejo de datos y programación como HEC-DSSVue, Anaconda con Python, y shell scripts en GNU/Linux.



Figura 1. Cuenca del río Guadalentín

El modelo se ha calibrado utilizando los hidrogramas que maneja la Confederación Hidrográfica del Segura para la presa de Puentes, que son producto de los correspondientes estudios hidrológicos. El modelo hidrológico general preparado en HEC-HMS utiliza los siguientes modelos específicos: método del número de curva del Soil Conservation Service (SCS) para las pérdidas por infiltración, hidrograma unitario del SCS para el proceso de transformación lluvia-caudal, y el método de Muskingum para los tránsitos en cauce.

Una vez preparado el modelo de la cuenca se han podido realizar simulaciones continuas del modelo con la herramienta basada en HEC-HMS.

La herramienta se ha desarrollado mediante scripts entre HEC-DSSVue (aplicación Java que utiliza Jython), Anaconda (distribución Python) utilizando Py4J (uno de los paquetes de Python que permite a los programas de Python acceder dinámicamente a objetos arbitrarios de Java), y secuencias de comandos de shell. Conexión entre HEC-DSSVue y Anaconda usando Py4j: Para usar el editor ofrecido en Anaconda se ha utilizado una librería Py4j y se ha preparado un script adecuado que hace de puente entre la aplicación de Java (HEC-DSSVue) y una utilidad de Python (Anaconda).

La herramienta final se presenta en la forma de un script que corre con un intervalo de tiempo determinado por el usuario, usando el programa Cron Tab. El script comienza con la actualización de la lluvia (guardando la predicción a partir de archivos de texto al archivo DSS). Entonces, después de la realización de una simulación en HEC-HMS, se comprueba si algún caudal pico excede el límite. Una vez que se cumple esta condición, se enviará la alerta correspondiente mediante correo electrónico (figura 2).

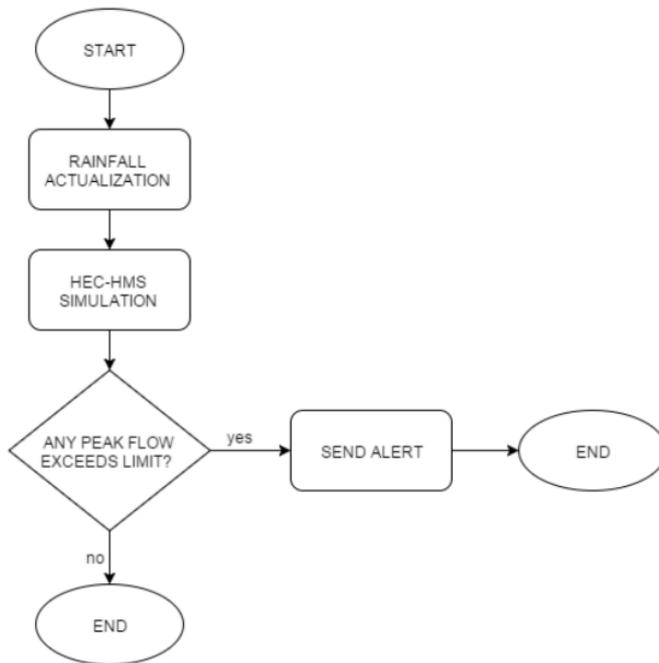


Figura 2. Diagrama de flujo de la herramienta basada en HEC-HMS para la predicción de crecidas en tiempo real

Esta alerta, que constituye una advertencia sobre un cierto peligro relacionado con los caudales pico, permite al gestor actuar de forma preventiva en la gestión de emergencias por inundación. En particular, si el punto de control es la entrada a un embalse, la información proporcionada por esta herramienta se podrá utilizar para gestionar de forma óptima el embalse y programar adecuadamente las maniobras de los órganos de desagüe de la presa o del conjunto de presas que conformen el sistema. Esta herramienta, por tanto, constituye un valioso apoyo para todos los organismos involucrados en la ejecución de las actuaciones previstas en los Planes de Emergencia de Presas.



## Estudio experimental de cuencos de disipación tipo Lyapin

**Rocío López, Antonio Viguera, Luis G. Castillo, José M. Carrillo**

**Grupo I+D+i Hidr@m. Universidad Politécnica de Cartagena. UPCT**

La misión principal de las estructuras disipadoras de energía en grandes presas es reducir el tamaño y, por tanto, el coste de dichos cuencos. Con estas estructuras se consigue un acortamiento de la longitud del resalto hidráulico, limitando, así, la erosión o socavación a pie de presa y su posible vuelco. Además se garantiza un régimen de restitución al medio natural lo más estable posible.

Ranga Raju (1980) presentó algunos resultados del funcionamiento de los cuencos de disipación forzados con bloques trapezoidales, en tanto que Oliveira y Lobo (1978) estudiaron el comportamiento de la estructura tipo Lyapin.

En el presente estudio se presentan los resultados que se han obtenido para los tipos de cuenco citados y construidos en el canal de laboratorio de la Universidad Politécnica de Cartagena.

El canal (figura 1) es de 10 m de largo, 0.45 m de alto y 0.31 m de ancho. Los bloques han sido diseñados para los parámetros característicos del flujo y se han construido mediante una impresora 3D (figura 2).



Figura 1. Vista general del canal

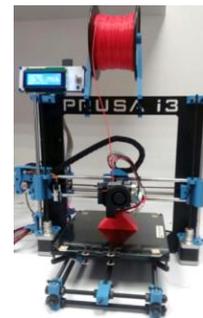


Figura 2. Impresión de un bloque de impacto

En primer lugar, se ha hecho un contraste teórico-experimental con los estudios realizados por Ranga Raju (1980), obteniéndose resultados similares, aunque se observa una mayor dispersión y una tendencia media de los puntos algo inferior (figura 3). A continuación se ha procedido a estudiar otro tipo de bloque de impacto del cual no se dispone de una bibliografía consolidada: la estructura normalizada Lyapin. El Instituto de Vedeneev de Investigación en Ingeniería Hidráulica de la ex URSS (VNIIG) recomienda una serie de características para la geometría de estos bloques (Oliveira y Lobo, 1978).

En los ensayos realizados se ha dispuesto una fila de bloques trapezoidales cuya altura va en función del número de Froude del ensayo. Siguiendo las recomendaciones, se dispone la fila de bloques a una distancia con respecto al aliviadero igual a 3 veces el calado conjugado subcrítico ( $X_0 = 3 Y_2$ ).

Los resultados obtenidos en las diferentes campañas de muestreo, siguiendo las recomendaciones del Instituto de Vedeneev, tanto para la geometría de las piezas como para la disposición en el canal de las mismas, han arrojado resultados satisfactorios.

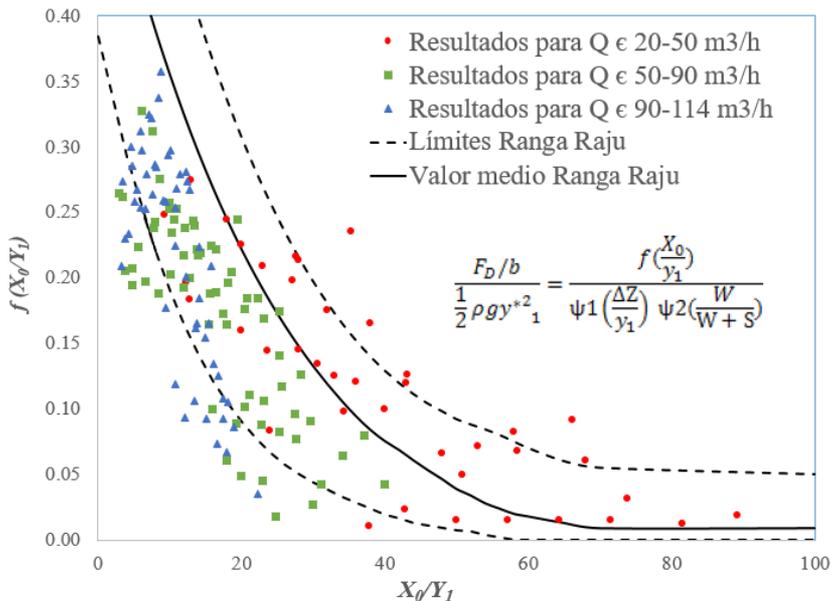


Figura 2. Comparación de los resultados obtenidos en la UPCT con los arrojados en los estudios de Ranga Raju (1980)

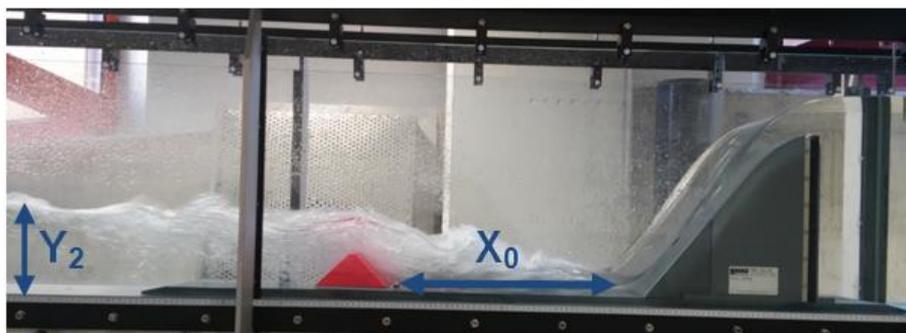


Figura 3. Ensayo realizado con la estructura normalizada tipo Lyapin

Al interceptar el flujo del resalto hidráulico con el bloque de impacto la disipación de energía aumenta. De esta forma se ha obtenido una reducción media de la longitud de los resaltos hidráulicos del 40%. Así mismo, los calados conjugados  $Y_2$  disminuyen, en general, alrededor del 10% con respecto a los que se habían obtenido sin la disposición de los bloques.

Aunque en general los resultados obtenidos han sido satisfactorios, se ha observado que en algunos ensayos con posiciones particulares de los bloques, la reducción del calado conjugado no es apreciable.

Se plantea seguir este estudio, buscando una relación entre la posición de los bloques ( $X_0$ ) y el calado conjugado subcrítico ( $Y_2$ ), con el objeto de mejorar los resultados hasta ahora obtenidos y así mismo, analizar los fenómenos de cavitación potencial que se producen en los bloques.

### Referencias.

Oliviera Lemos, F. y Lobo Ferreira, J. (1978). Estructuras compactas para dissipacao de enegia por ressalto. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil de Lisboa. Memoria N° 502.

Ranga Raju, K. G. (1980). *Analysis of Flow Over Baffle Blocks and End Sills*. Journal of Hydraulic Research. Vol 10, N°4.



## **Análisis numérico y experimental de la socavación aguas abajo de la presa Toachi**

**Luis G. Castillo, José M. Carrillo**

***Grupo I+D+i Hidr@m. Universidad Politécnica de Cartagena. UPCT***

El Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón se encuentra ubicado al suroeste de la ciudad de Quito (Ecuador). El Proyecto se desarrolla en las cuencas de los ríos Pilatón y Toachi, que nacen en la cordillera occidental de los Andes y forman parte del río Esmeraldas, que desemboca en el Océano Pacífico, en la costa norte de Ecuador.

La presa Toachi, que recoge las aguas de las cuencas de los ríos Toachi y Sarapullo, es de hormigón a gravedad. Tiene una altura máxima desde la cota de cimentación de 59 m, una longitud de coronación de 170.5 m y un ancho de 10 m. Sus paramentos aguas arriba y aguas abajo son inclinados con taludes V:H = 1:0.3 y 1:0.7, respectivamente. La cota de coronación se sitúa a 973 msnm. A la cota máxima de regulación (970 msnm), la presa crea un embalse de un volumen total de unos 8 Hm<sup>3</sup>. A ese nivel, el embalse se extiende una longitud máxima de 1.3 km en el río Sarapullo y 3.2 km en el río Toachi. La presa cuenta con dos vertederos finalizados en trampolín de lanzamiento, cuya capacidad individual es de 600 m<sup>3</sup>/s para la avenida de diseño.

En este estudio se va analizar la socavación generada por el salto en esquí comparando 4 metodologías complementarias: modelación física; formulaciones empíricas; método semiempírico de fluctuaciones de presión e índices de erosionabilidad; y simulaciones numéricas tridimensionales realizadas con programas de dinámica de fluidos computacional.

El modelo físico, escala 1:50, fue construido de acuerdo a la información técnica entregada por HIDROTOAPI-EP en el Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional (Ecuador).

Con el modelo físico se obtiene la ubicación, forma, tamaño y profundidad máxima de los fosos de socavación que se conforman en el cuenco de disipación de energía al pie de la presa, como resultado del impacto de los chorros lanzados desde los saltos en esquí que se ubican al final de la rápida de descarga de los vertederos de excesos (Velasco y Vera, 2012). Los saltos

en esquí disponen de dos deflectores que proyectan los chorros hacia la zona central del cuenco, en donde la inestabilidad de las márgenes obliga a centrar las fosas de socavación alejadas de los contornos laterales.

Los caudales fueron seleccionados en función de los caudales de crecida, proporcionados en el informe hidrológico del proyecto para el sitio donde se ubica la presa Toachi. La investigación experimental se realiza para tres tamaños representativos de material pétreo que conforman el cuenco amortiguador (Hermosilla, 2013).

La mayor parte de las ecuaciones existentes para la estimación de la erosión a pie de presa han sido obtenidas mediante análisis dimensional y análisis estadístico de datos obtenidos en modelos reducidos construidos bajo leyes de semejanza de Froude para el cálculo de la socavación aguas abajo de un salto en esquí. Algunas formulaciones están basadas en mediciones de prototipos. Siguiendo Castillo y Carrillo (2015), para este trabajo se han seleccionado veintinueve ecuaciones y se ha determinado la profundidad de socavación en la zona de impacto para caudales de diferentes períodos de retorno.

El índice de erosionabilidad se basa en un umbral de erosión que relaciona la magnitud de la capacidad erosiva del agua con la capacidad relativa de un material (natural o artificial) para resistir la erosión. Según Annandale (2006), el proceso de erosión es debida a las fluctuaciones de presión, más que a un proceso de corte. Las presiones dinámicas de los chorros se relacionan con la intensidad de la turbulencia en las condiciones de descarga, la longitud del vuelo del chorro, el diámetro (chorros circulares) o el espesor (chorros rectangulares) en las condiciones incidentes y la profundidad del colchón de agua en el cuenco de disipación. Para ello se utilizan los resultados presentados por Carrillo (2014) y Castillo et al. (2015).

Para la simulación numérica del cuenco de socavación se ha empleado el programa de diferencias finitas FLOW-3D. Este paquete informático está muy extendido en el mundo de la ingeniería de presas. Presenta diversos modelos específicamente diseñados para el campo de la hidráulica: transporte de sedimentos, erosión, cavitación, la lámina libre bien definida, etc.

Teniendo en cuenta los resultados del modelo físico, se ha calibrado y se ha simulado numéricamente el comportamiento hidráulico y las socavaciones generadas en el cauce por el aliviadero en salto en esquí.

Los resultados ponen de manifiesto la idoneidad de cruzar distintas metodologías para conseguir una adecuada solución de fenómenos complejos

como es el caso de la erosión al pie de presa. De este modo, las simulaciones numéricas sirven como complemento de las formulaciones clásicas y de los modelos de laboratorio, permitiendo ahondar en el conocimiento de los fenómenos físicos para obtener la mejor solución.

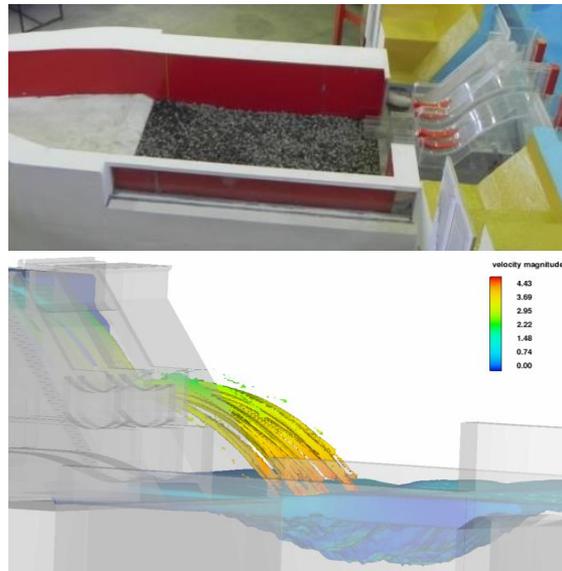


Figura 1. Modelos físico y numérico del trampolín de lanzamiento de la presa Toachi.

### Referencias bibliográficas.

Annandale, G. W. (2006). Scour technology. Mechanism and engineering practice. McGraw-Hill.

Carrillo, J.M. (2014). Metodología numérica y experimental para el diseño de los cuencos de disipación en el sobrevertido de presas de fábrica. PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cartagena, Spain.

Castillo, L. G. and Carrillo, J. M. (2015). "Characterization of the dynamic actions and scour estimation downstream of a dam". Proc. Int. Conf. Dam Protections against Overtopping and Accidental Leakage. pp. 231-243. Madrid, Spain.

Castillo, L. G., Carrillo, J. M. and Blázquez, A. (2015). "Plunge pool mean dynamic pressures: a temporal analysis in nappe flow case". Journal of Hydraulic Research, Vol. 53, No. 1, pp. 101-118.

Flow Science, Inc. (2011). FLOW-3D. Theory v10.0.

Hermosilla, D.H. (2013). Estudio experimental en modelo físico sobre el desarrollo del cuenco de socavación al pie de la Presa Toachi. Tesis de Grado. Quito: Escuela Politécnica Nacional-Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental.

Hidrotoapi E.P. (2010). Informe 6256.0-R-18. Presa Toachi. Hidráulica. Memoria de cálculo. Quito.

Velasco, C. and Vera, P. (2012). Estudio en modelo físico de la disipación de energía aguas debajo de los vertederos de excesos y desagües de fondo de la Presa Toachi Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón. Tesis de Grado. Quito: Escuela Politécnica Nacional-Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental.

## **Análisis numérico y experimental de velocidades en cuencos de vertido libre**

**Luis G. Castillo, José M. Carrillo**

***Grupo I+D+i Hidr@m. Universidad Politécnica de Cartagena. UPCT***

En el reintegro de los caudales evacuados por los órganos de desagüe, la disipación de energía en los cuencos de amortiguación se produce principalmente mediante el proceso de turbulencia. En las dos tipologías básicas (cuencos de resalto y cuencos de vertido libre) aparecen fenómenos de alta turbulencia y aireación, que no pueden ser convenientemente estudiados únicamente con las metodologías clásicas.

Teniendo en cuenta esta problemática, y partiendo de los distintos resultados experimentales obtenidos en el estudio de vertidos libres, se está llevando a cabo la caracterización de este tipo de flujos en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Cartagena. Se están registrando y analizando velocidades, presiones y tasas de aireación.

La metodología de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite simular la interacción entre distintos fluidos, como es el caso de los flujos bifásicos agua-aire que aparecen en el fenómeno de vertido libre. Los métodos implementados en CFD se basan en la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes y promediado de Reynolds (RANS), junto con modelos de turbulencia de distintos grados de complejidad. De este modo, los resultados obtenidos en laboratorio se contrastan y complementan con la modelación numérica.

En este trabajo se analizan y comparan las velocidades medidas en el cuenco de disipación en laboratorio, con las simulaciones realizadas con el programa comercial ANSYS CFX.

Para avanzar en el conocimiento del fenómeno de vertido libre, se están realizando diferentes campañas de medida de velocidades instantáneas con equipos Doppler en distintas secciones del cuenco amortiguador.



Figura 1. Medición de velocidades con equipo Doppler

Paralelamente, se están realizando simulaciones numéricas en régimen transitorio. Se emplean modelos de turbulencia isotrópicos de dos ecuaciones para analizar la mayoría de las variables que intervienen en el fenómeno, y modelos de cierre de segundo orden para obtener una mejor caracterización de la turbulencia del chorro.

La figura 2 muestra los perfiles de velocidad media horizontal y vertical obtenidos en laboratorio para distintas secciones aguas abajo del punto de estancamiento. La figura 3 muestra los vectores de velocidades medias obtenidas en la simulación numérica a igualdad de condiciones. En ambos casos se observa la existencia de un chorro de fondo. A partir de una determinada distancia, el perfil del flujo tiende a una distribución uniforme.

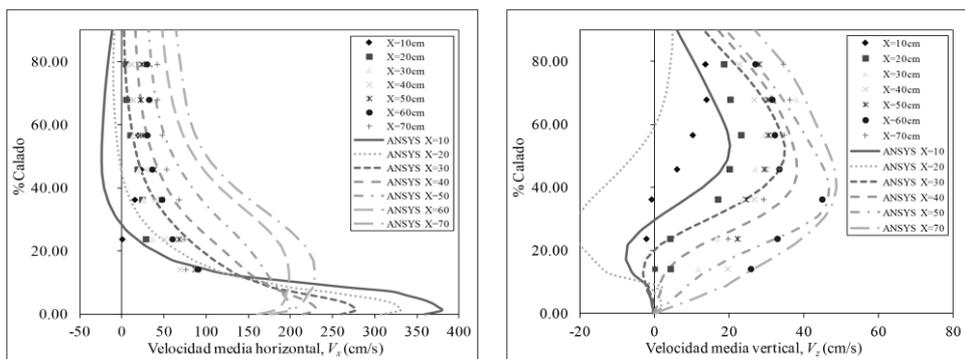


Figura 2. Distribución de velocidades medias horizontales y verticales aguas abajo del punto de estancamiento

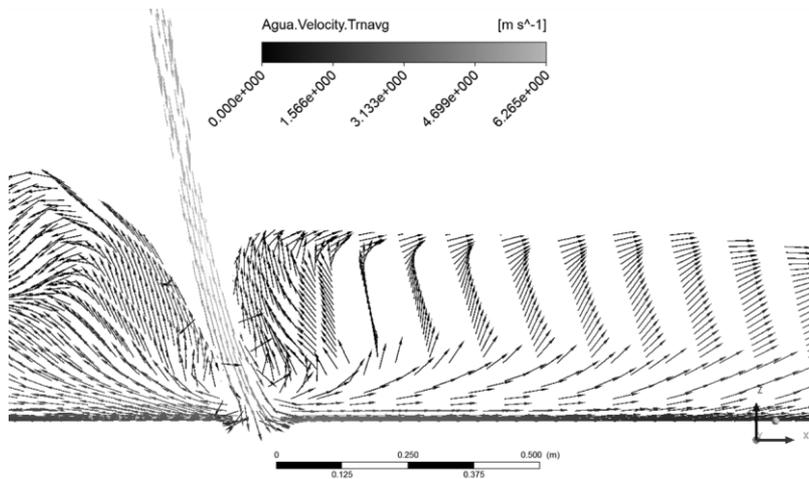


Figura 3. Velocidad media horizontal simulada con CFD

### Referencias bibliográficas.

Carrillo, J.M. (2014). Metodología numérica y experimental para el diseño de los cuencos de disipación en el sobrevertido de presas de fábrica. PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cartagena, Spain.

Castillo, L.G. 2009 Measurement of velocities and characterization of some parameters inside of free and submerged hydraulic jumps. Proceedings of 33rd International Association of Hydraulic Engineering & Research Congress, Vancouver, Canada.

Chanson, H. & Brattberg, T. 2000 Experimental study of the air-water shear flow in a hydraulic jump. *International Journal of Multiphase Flow*, 26(4), 583-607.

Frizell, K.W. 2000 Effects of aeration on the performance of an ADV. In: 2000 Joint Conf. on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management. ASCE. Hotchkiss, R.H., Glade, M. (Eds.), Minneapolis, USA (CD-ROM).

Matos, J., Frizell, K.H., Andre, S., & Frizell, K.W., 2002 On the performance of velocity measurement techniques in air-water flows. In: *Hydraulic Measurements and Experimental Methods Conference 2002*. ASCE. Wahl, T.L., Pugh, C.A., Oberg, K.A., Vermeyen, T.B. (Eds.). Estes Park, CO, USA.



## **Comparación de códigos CFD en el modelado de estructuras hidráulicas**

**Arnau Bayón, Juan Francisco Macián, Francisco J. Vallés, Petra Amparo López**

***Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València***

El presente trabajo surge como fruto de la necesidad de adecuar las estructuras hidráulicas a los nuevos escenarios de avenidas que plantea el cambio climático. Para ello, los modelos de fluidodinámica computacional (CFD), siempre con el imprescindible apoyo de las técnicas experimentales, suponen una alternativa fiable y eficiente.

Una de las principales líneas de trabajo del Laboratorio de Hidráulica de la Universitat Politècnica de València (UPV) consiste, en ese sentido, en evaluar la validez de diferentes códigos para su aplicación al diseño de estructuras hidráulicas (Vallés-Morán et al., 2011). En el presente trabajo, dicha comparación se centra en los modelos FLOW-3D y OpenFOAM. Para poner a prueba ambos códigos, se modela un mismo caso de estudio y se comparan los resultados con datos experimentales.

Los tres tipos de estructura analizados son una pila de puente cilíndrica, un aliviadero escalonado y un cuenco de amortiguación. En todos ellos, se emplea un modelo basado en el FVM y el VOF, con cierre de turbulencia tipo RANS, mallas estructuradas y modelo de pared. En el caso de las estructuras de disipación de energía, la aireación juega un papel fundamental. No obstante, el análisis se centra en la caracterización estrictamente hidrodinámica de los fenómenos.

En el caso de la pila de puente, se contemplan dos escenarios, con lecho sin erosionar y otro con lecho en equilibrio erosivo-sedimentario. En el paso de un escenario a otro se observa una fuerte redistribución de esfuerzos cortantes sobre el lecho, amén de diferencias en la frecuencia de despegue de vórtices de Von Kármán según el código (Bayón et al., 2014). La validación experimental se lleva a cabo mediante ensayos en un canal sedimentológico del Laboratorio de Hidráulica y fuentes bibliográficas.

En el caso de los aliviaderos escalonados, se realiza un trabajo preliminar de puesta a punto del modelo (Bayón et al., 2015) y se compara con experimentales del Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Lisboa, Portugal. Un nuevo trabajo, en revisión, compara, además, diferentes modelos de turbulencia y esquemas de discretización numérica.

En el tercer caso, el análisis de cuencos de disipación, los resultados del modelo ejecutado con OpenFOAM y FLOW-3D son comparados con datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Hidráulica de la UPV y la bibliografía disponible, demostrándose, al igual que en los otros dos casos de estudio descritos, que OpenFOAM y FLOW-3D son capaces de reproducir fielmente el fenómeno en cuestión, en este caso, un resalto hidráulico, con gran precisión (Bayón y López-Jiménez, 2015; Bayón et al., 2016).

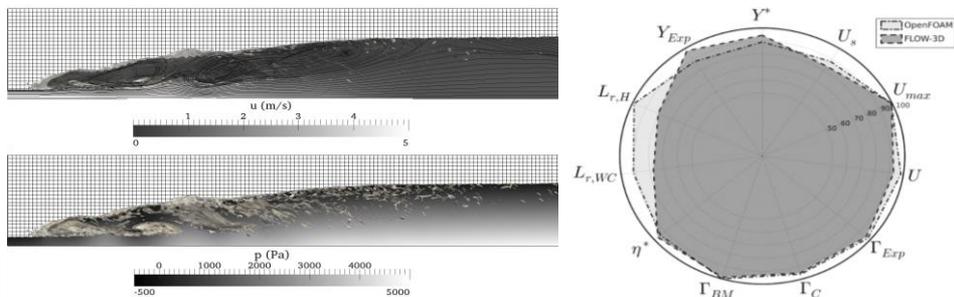


Figura 1. Distribución de velocidades y presiones, líneas de corriente y formación de burbujas en una simulación de resalto hidráulico con OpenFOAM (Bayón y López-Jiménez, 2015) y comparación de precisiones OpenFOAM vs. FLOW-3D (Bayón et al., 2016)

## Referencias.

Bayón, A., Valero, D., Vallés-Morán, F., López-Jiménez, P.A., 2014. Comparison of CFD models for multiphase flow evolution in bridge scour processes. 5th IAHR International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, Spa (Bélgica).

Bayón, A., López-Jiménez, P.A., 2015. Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM. J. Hydroinformatics 17, 662–678.

Bayón, A., Matos, J., López-Jiménez, P.A., 2015. Modelado matemático de flujo no aireado en aliviaderos escalonados mediante OpenFOAM. IV Jornadas de Ingeniería del Agua, Córdoba (España).

Bayón, A., Valero, D., García-Bartual, R., López-Jiménez, P.A., Vallés-Morán, F.J., 2016. Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environ. Model. Softw.* 80, 322–335.

Vallés-Morán, F.J., Palau-Salvador, G., Bihs, H., Fernandez, A., Hernandez-Albentosa, E., Martinez-Corral, J., Andres-Domenech, I., 2011. Experimental and Numerical Modelling of Scour at Bridge Piers. 34th World Congress of the IAHR, Brisbane (Australia).