

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 2017**

**EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

Primera edición, 2017

© Editores

Luis José Balairón Pérez

David López Gómez

© de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València
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 2017. COMUNICACIONES DE LAS LÍNEAS PRIORITARIAS

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

Madrid, 21 de junio de 2017

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 21 de junio de 2017 en la Universidad Politécnica de Cataluña.

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
- 2017 Barcelona, Grupo Flumen, Universidad Politécnica de Cataluña, UPC

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 degradados

TALLERES DE REALIDAD AUMENTADA PARA ACERCAR LAS ECUACIONES DE SAINT-VENANT A LA SOCIEDAD (J. M. ^a Carrillo, L. G. Castillo y J. T. García).	7
MODELACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE UNA BARRA DE GRAVAS EN EL RÍO ÉSERA CON IBER. (B. Nácher-Rodríguez, F. J. Vallés-Morán, A. Balaguer-Beser, G. Lobera, J. A. López-Tarazón, D. Vericat, R. J. Batalla)	11
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DE LOS MACRÓFITOS (E. Bladé Castellet, M. Sanz-Ramos, A. Palau)	15
DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VISCOSIDAD DE UNA SALMUERA (A. Triadú, J. Sanz, M. Sánchez-Juny, A. Andreu Torras)	19

Resúmenes Línea Prioritaria C

Riesgo asociado a la escorrentía urbana

TÉCNICAS DE MEDICIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN CONDUCCIONES DE SANEAMIENTO UNITARIO (M. Regueiro-Picallo, J. Anta, J. Suárez, J. Puertas, A. Jácome, J. Naves)	25
INCORPORACIÓN DE LAS LLUVIAS LOCALES Y LA INCERTIDUMBRE EN LAS CONDICIONES DE CONTORNO EN UN MODELO ANIDADO REGIONAL-LOCAL DE INUNDACIONES (M. Bermúdez, J. C. Neal, P.D. Bates, G. Coxon, J. E. Freer, L. Cea, J. Puertas)	29
MONTAJE DE UN SIMULADOR DE LLUVIA MEDIANTE GOTEROS PARA ESTUDIOS DE DRENAJE URBANO (J. Naves, J. Anta, J. Puertas, J. Suárez, M. Regueiro)	33
ESTUDIO DE LAS DESCARGAS DE SISTEMAS UNITARIOS (DSUS) DURANTE EPISODIOS DE LLUVIA EN LA CIUDAD DE MURCIA (J.T. García, P. Espín-Leal, A. Viguera-Rodríguez, L. G. Castillo, J. M. ^a Carrillo)	37
COMPARACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE LAS REJILLAS TRANSVERSALES CONTINUAS. (J. Téllez Alvarez, M. Gómez Valentín, A. Paindelli, B. Russo)	41

ESTUDIO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO DE SALIDA DE LA RED DE ALCANTARILLADO A TRAVÉS DE LOS IMBORNALES (M. Gómez Valentín, A. González Alvarado, J. Téllez Álvarez).....45

Resúmenes Línea Prioritaria D

Seguridad de presas. Aspectos hidrológicos e hidráulicos

MODELACIÓN NUMÉRICA DEL DESAGÜE DE MEDIO FONDO REHABILITADO DE LA PRESA DE BÁRCENA. (D. López Gómez, T. Ramos del Rosario, J. J. Rebollo Cillán)51

MEDIDAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE FLUJOS EMULSIONADOS (J. J. Rebollo Cillán, D. López Gómez, R. Herrero Santos, T. Ramos, L. Garrote).55

ANÁLISIS DEL PARÁMETRO DE TURBULENCIA INICIAL EN EL VERTIDO LIBRE DE PRESAS DE FÁBRICA (L. G. Castillo y J. M.^a Carrillo).....61

ANÁLISIS DE LOS FACTORES CON MAYOR INFLUENCIA EN LA EROSIÓN EN LA SALIDA DE UNA OBRA DE DRENAJE65

APLICACIÓN DE TÉCNICAS CFD PARA EL ANÁLISIS DE DESAGÜES PROFUNDOS EN GRANDES PRESAS (A. Bayón, J. F. Macián-Pérez, F. J. Vallés-Morán)67

DISEÑO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS PREVIO DE RESALTOS HIDRÁULICOS ESTACIONARIOS DE ALTO NÚMERO DE REYNOLDS (J. F. Macián-Pérez, A. Bayón, F. J. Vallés-Morán, R. García-Bartual, P. A. López-Jiménez).....69

BLOQUE EN FORMA DE CUÑA (WSB) CON SISTEMA DE DRENAJE Y AIREACIÓN PARA PROTECCIÓN FRENTE A LA EROSIÓN POR CORRIENTES DE AGUA (F. J. Caballero, R. Morán, , C. Ponce-Farfán, R. Oliva, M.A. Toledo, J. San Mauro, F. Salazar, L. Ruano, M. Monterde, J. L. García-Ramos)73

ANÁLISIS NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL DEL FLUJO GENERADO POR LA ROTURA DE UNA PRESA (E. Sánchez-Cordero, J. Boix, M. Gómez, E. Bladé)77

LÍNEA PRIORITARIA A

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

Talleres de realidad aumentada para acercar las ecuaciones de Saint-Venant a la sociedad

J. M.^a Carrillo, L. G. Castillo, J. T. García

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

Desde hace varios años, el Grupo Hidr@m de la UPCT viene realizando diversas actividades de divulgación sobre el papel fundamental que tienen las Obras Hidráulicas en la sociedad actual. En este sentido se han llevado a cabo distintos talleres interactivos para estudiantes de primaria y secundaria donde se analiza el funcionamiento de las presas de gravedad, sistemas de captación de pozos para regadío, redes urbanas de abastecimiento y la evolución de los ríos en mesas de meandros, entre otros.

Las sesiones se han desarrollado tanto en las instalaciones de la propia universidad como en distintas bibliotecas municipales de Cartagena y en las aulas hospitalarias del Hospital Clínico Universitario Virgen de la Arrixaca de Murcia (ver Figura 1).



Figura 1. Talleres de evolución de ríos en aulas hospitalarias, bibliotecas municipales e instalaciones de la UPCT.

Dentro de estas actividades, se ha analizado la posibilidad de sustituir las mesas de meandros, aparatosas para su transporte a los distintos lugares de realización de los talleres, por un taller de realidad aumentada (augmented reality o AR) que permita la interacción en tiempo real.

El código utilizado por el AR Sandbox fue desarrollado Kreylos (2017) y está disponible para su descarga bajo licencia GNU General Public License.

La cámara Kinetic captura las imágenes a una frecuencia de 30 fotogramas brutos por segundo. Las imágenes son tratadas con un filtro estadístico (por defecto 30 fotogramas de tamaño por búfer, correspondientes a 1 segundo de tiempo de respuesta). El tratamiento permite filtrar los objetos en moviendo como las manos o las herramientas empleadas, reducir el ruido inherente en la medición de la profundidad por la cámara Kinetic, y rellenar los datos que faltan en profundidad. Una vez realizada la calibración del equipo, la superficie topográfica resultante se procesa desde el punto de vista del proyector de corto alcance suspendido sobre la caja de arena, de modo que la topografía proyectada coincide con la topografía real de arena. El programa utiliza una combinación de distintos sombreados para colorear la superficie en función de la elevación utilizando una escala de colores preconfigurada y dibuja las curvas de nivel en tiempo real.

Al mismo tiempo, se ejecuta la simulación del flujo de agua resolviendo las ecuaciones de aguas someras de Saint-Venant, y los resultados se visualizan con otro conjunto de sombreados. Las ecuaciones diferenciales se resuelven con un esquema explícito de segundo orden, utilizando la superficie de arena virtual como condición de contorno. Siguiendo a Kurganov & Petrova (2007), se considera un término de viscosidad simple, condiciones de contorno abiertas en los bordes del dominio de cálculo definido durante la calibración, e integración temporal con un Runge-Kutta de segundo orden.



Figura 2. Taller con AR Sandbox.

Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud por los fondos recibidos de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), Proyectos Ingeniería en tu biblioteca: Circuito de Talleres Tecnológicos de la UPCT, UPCT Ingeniosanos y Campus de la Ingeniería.

The Augmented Reality Sandbox was developed by the UC Davis W.M. Keck Center for Active Visualization in the Earth Sciences (KeckCAVES, <http://www.keckcaves.org>), supported by the National Science Foundation under Grant No. DRL 1114663.

Referencias bibliográficas

Kreylos, O. (2017). About – Augmented Reality Sandbox. [Arsandbox.ucdavis.edu](http://arsandbox.ucdavis.edu). Retrieved 7 February 2017, from <https://arsandbox.ucdavis.edu/about/>

Kurganov, A. & Petrova, G. 2007 A second-order well-balanced positivity preserving central-upwind scheme for the Saint-Venant System. *Communications in Mathematical Sciences*, 5(1), 133-160.

Modelación de la evolución de una barra de gravas en el río Ésera con Iber

B. Náchero-Rodríguez¹, F. J. Vallés-Morán¹, A. Balaguer-Beser² G. Lobera³, J. A. López-Tarazón^{3,4,5}, D. Vericat^{3,6}, R. J. Batalla^{3,6,7}

¹ Research Institute of Water and Environmental Engineering. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia. Spain. beanacro@cam.upv.es.

² Department of Applied Mathematics. Universitat Politècnica de València. Cno. De Vera s/n 46022 Valencia. Spain.

³ Fluvial Dynamics Research Group – RIUS, University of Lleida, Lleida, Catalonia, Spain.

⁴ Institute of Earth and Environmental Science, University of Potsdam, Potsdam, Germany.

⁵ School of Natural Sciences and Psychology, Liverpool John Moores University, Liverpool, UK.

⁶ Forest Sciences Centre of Catalonia, Solsona, Catalonia, Spain.

⁷ Catalan Institute for Water Research, Girona, Catalonia, Spain.

En el marco del proyecto Consolider Ingenio 2010 CSD2009-00065 SCARCE, se monitorizó, durante un periodo de tres años, la evolución morfológica y granulométrica de una barra de gravas, localizada en un tramo del río Ésera; concretamente, en su paso por la localidad de Perarrúa (Aragón).

La barra, que a lo largo del tiempo había sufrido diferentes modificaciones debido a la hidrodinámica natural del tramo, fue eliminada tras una extracción masiva de áridos durante los inicios del proyecto. A partir de ese momento, se llevaron a cabo levantamientos topográficos y batimétricos periódicos de la zona de estudio, junto con la medición de la distribución granulométrica de los sedimentos, coberturas de vegetación y usos del suelo, caudales circulantes y puntos de calibración, y transporte de sedimentos en suspensión y carga de lecho. Todo ello se ha empleado para la reconstrucción de la evolución de la nueva barra formada, tal y como se muestra en la Figura 1, mediante modelación matemática hidráulico – sedimentológica, bidimensional, con el modelo Iber.



Figura 1. Fotografías aéreas de la barra antes de la extracción (2009), después de la extracción de áridos (2012), y tras su nueva formación (2015).

La serie de caudales circulantes durante todo el periodo monitorizado (desde 2011 hasta 2014) presenta varios picos, correspondientes con crecidas en el río Ésera. Para determinar cuáles de estas crecidas son significativas desde el punto de vista de la formación de la barra (o de la generación de cambios morfológicos importantes en el río) se llevaron a cabo, en una primera etapa, simulaciones con lecho fijo para diferentes caudales pico. El análisis de tensiones tangenciales generadas por estos caudales, en comparación con las tensiones críticas de inicio de movimiento del material existente en el cauce, permitió filtrar los eventos a simular posteriormente con lecho móvil. Un total de siete eventos, de una duración que varía entre 24 y 48 horas, están siendo simulados de manera sucesiva. Es decir, el terreno deformado resultante del paso del primer evento, se emplea como terreno de partida para la simulación del siguiente (Figura 2).

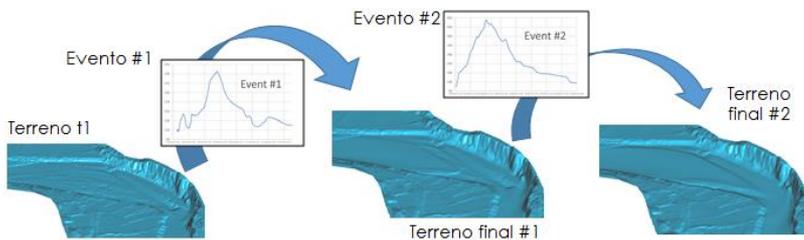


Figura 2. Simulaciones sucesivas de los eventos que generan cambios morfológicos significativos.

El módulo de transporte de sedimentos como carga de lecho, principal responsable de la modificación morfológica del cauce, está activado con la formulación de Meyer-Peter y Müller. Como condiciones de contorno de transporte de sedimentos, se está empleando tanto condiciones de aguas claras como de capacidad de transporte en la sección extrema aguas arriba (al no disponerse de datos de campo en avenida).

Los resultados de las simulaciones llevadas a cabo hasta el momento muestran la formación de una barra central principal en el lado de margen izquierda, con

una segunda barra, separada por un canal intermedio, en el lado de margen derecha. Esta configuración, diferente a la previa a la extracción (con una barra única), ya existía en diferentes instantes temporales del pasado (recuperados de ortofotos históricas).

Una de las principales dificultades ha sido la de generar simulaciones numéricamente estables a lo largo de todo el hidrograma de avenida, especialmente en aquellas en las que el caudal pico provoca la movilización masiva de sedimentos en toda la zona de estudio.

En cuanto al transporte en suspensión, es posible que el material más fino juegue un papel importante en la fijación de la barra en sus primeros estadios. Queda pendiente la realización de simulaciones con el módulo de transporte en suspensión, para la evaluación de su comportamiento mediante la comparación con los datos tomados en campo.

Estudio del comportamiento hidrodinámico de los macrófitos

E. Bladé Castellet¹, M. Sanz-Ramos¹, A. Palau²

¹ Instituto FLUMEN (UPC-CIMNE). E.T.S. de Ing de Camins, C. y P. de Barcelona. ernest.blade@upc.edu, marcos.sanz-ramos@upc.edu.

² Departament de Mediambient i Ciències de la Terra. Universitat de Lleida. apalau@macs.udl.cat.

Introducción y objetivos

El masivo crecimiento de macrófitos en ríos regulados está provocando problemas ecológicos, económicos y sociales de relevancia. En el caso del Bajo Ebro las autoridades y los gestores están llevando a cabo campañas para la remoción de esta especie, siendo la opción más aceptada la ejecución de avenidas controladas que los arranquen y los arrastren. El diseño de este tipo de avenidas requiere de una caracterización adecuada de la hidrodinámica del río, y de los macrófitos, a fin de que sean eficientes y eficaces.

El presente trabajo tuvo como objetivo principal evaluar el comportamiento hidrodinámico de los macrófitos mediante campañas de campo, a fin de calibrar un modelo numérico (Iber) que permitiese diseñar avenidas controladas. Se emplearon diferentes relaciones entre el coeficiente de rugosidad y la altura de agua, siendo estas de tipo i) constante, ii) variable y iii) variable con histéresis. Para ello se tuvo como base la avenida controlada realizada en abril de 2016 desde el embalse de Flix (tramo Flix – Central Nuclear de Ascó).

Se pudo observar que el mejor ajuste se produjo cuando las curvas empleadas fueron las tipo iii) *coeficiente de rugosidad – altura variable con histéresis*, donde se empleó una rama de subida diferente a la de bajada.

Campañas de campo

Se realizó una primera campaña para caracterizar el lecho y la ubicación de los macrófitos en octubre 2015, donde se obtuvo una la batimetría actualizada (Fig. 1 arriba izq.) y los usos del suelo (Fig. 1 arriba dcha.) del tramo de estudio. La segunda consistió en la observación del calado durante la ejecución de la avenida controlada de abril de 2016.

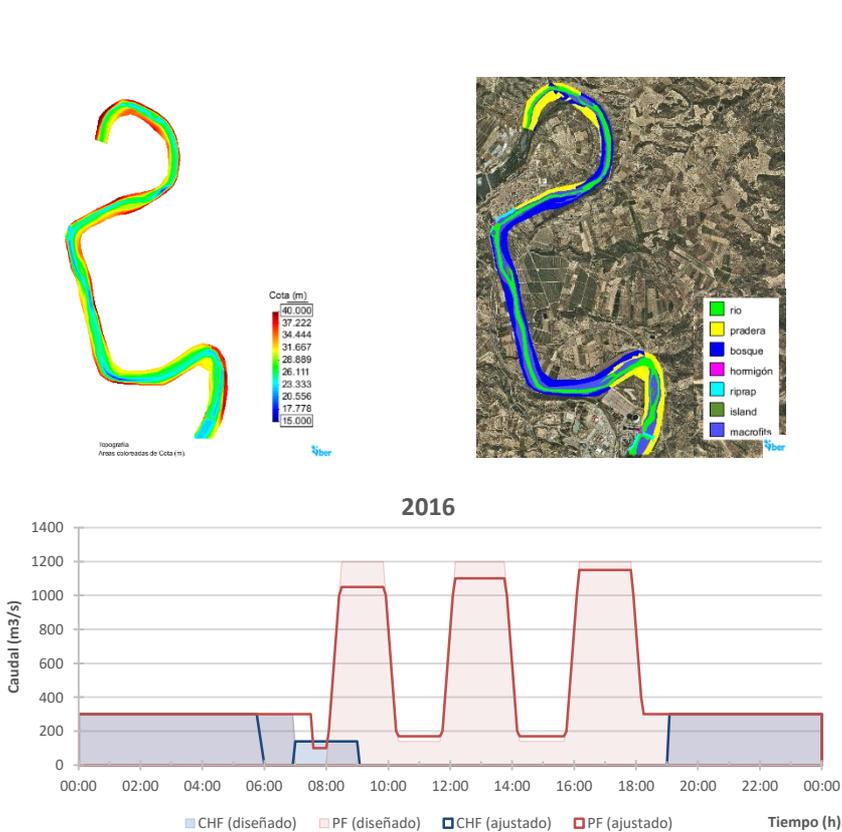


Figura 1. Batimetría del tramo de estudio (arriba izq.), mapa de usos del suelo (arriba dcha.) y hidrograma de la avenida controlada diseñada y ejecutada (abajo).

La avenida controlada fue diseñada por el Instituto Flumen, en colaboración con Endesa, con el fin de obtener el máximo número de puntos de medida (tres picos) y conseguir la mayor energía posible (incrementos de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ cada 5 minutos), salvaguardando los máximos caudales permitidos ($1200 \text{ m}^3/\text{s}$).

Calibración del modelo numérico (Iber)

La primera fase del proceso de calibración consistió en el ajuste del modelo numérico (Iber) al hidrograma realmente ejecutado (Fig. 1 abajo). Para ello se empleó la medida tomada en las cercanías del azud de la Central Nuclear de Ascó (P3, Fig. 2 arriba) por ser menos sensible al régimen hidráulico (cercano al crítico).

En la segunda fase se estudió la influencia del coeficiente de Manning en el modelo numérico, así como el empleo de diferentes tipologías de curvas para conseguir un ajuste adecuado a los puntos de medida. A tal fin se diseñaron y analizaron curvas de *altura de agua – coeficiente de Manning* constante, variable y variable con histéresis (Fig. 2 abajo).

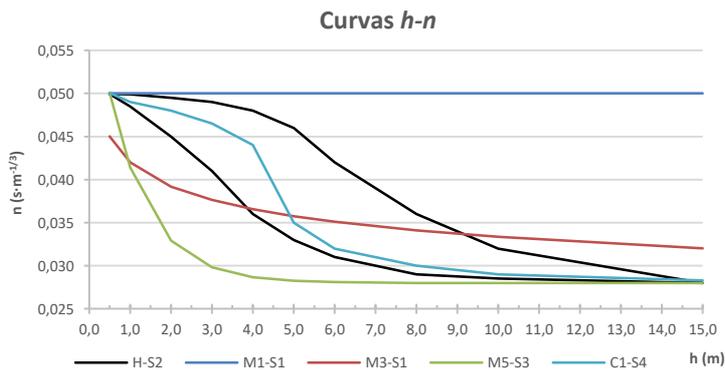
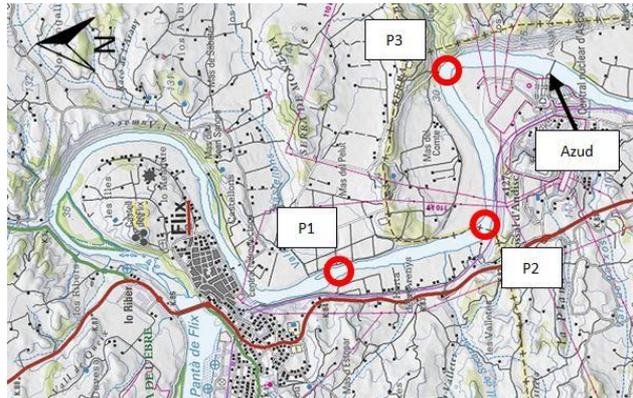


Figura 2. Zona de estudio y ubicación de los puntos de medida (izq.) y ejemplo de las tipologías de curvas $h-n$ empleadas (dcha.).

Resultados

Se realizaron un total de 77 simulaciones, combinación de los diferentes escenarios para el ajuste del hidrograma y de la rugosidad, en los que se pudo observar que:

- i) el tramo de río estudiado se comporta como un canal en régimen subcrítico (salvo en el azud);
- ii) se produce un fenómeno de vía de intenso desagüe debido a la distribución espacial de los macrófitos;
- iii) la rugosidad constante no ofreció buenos resultados, con sobreelevaciones por encima de los 35 cm y un mal ajuste en las ramas de incremento y decremento de nivel (Fig. 3 izq.);
- iv) las curvas de rugosidad variable presentaron un buen ajuste, sin embargo los picos se adelantaron y los valles se atrasaron (Fig. 3 cnt.);
- v) la rugosidad variable con histéresis presentó el mejor ajuste de todas, con un R^2 superior a 0.98 y con diferencias entre -0.05 m y +0.12 m en los picos y valles, y entre -0.07 m y +0.09 m en las partes intermedias (Fig. 3 dcha.).

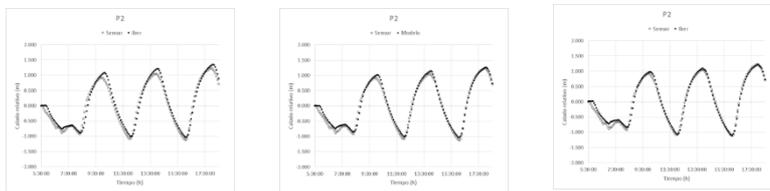


Figura 3. Comparación entre los datos observados y simulados en P2 para la rugosidad constante (izq.), rugosidad variable (centro) y rugosidad variable con histéresis (dcha.).

Conclusiones

El tramo del río Ebro entre la presa de Flix y la Central Nuclear de Ascó presenta diversos problemas relacionados con la presencia de macrófitos. El diseño y ejecución de avenidas controladas está sirviendo para controlar su masivo crecimiento. Con el fin de diseñar avenidas controladas más eficaces y eficientes, se han realizados diversas campañas experimentales para caracterizar el comportamiento hidrodinámico del río y de los macrófitos. Esta caracterización se ha llevado a cabo mediante simulación numérica (Iber) teniendo en cuenta diversas tipos de rugosidad para los macrófitos. Se ha podido observar que el mejor ajuste se presenta cuando la rugosidad de los macrófitos es de tipo variable considerando procesos de histéresis en sus curvas calado – rugosidad.

Determinación experimental de la viscosidad de una salmuera

A. Triadú^{ab}, J. Sanz^{a1}, M. Sànchez-Juny^{a2}, Antoni Andreu Torras^{b1}

^a *Instituto FLUMEN. (UPC-CIMNE) ETSICCP de Barcelona. arnau.triadu@upc.edu*

^b *Aigües de Barcelona, Empresa Metropolitana de Gestió del Cicle Integral de l'Aigua, SA, Grupo Suez.*

^{ab}arnau.triadu@upc.edu ^{a1}javiersanz900@gmail.com

^{a2}marti.sanchez@upc.edu ^{b1}aandreu@aiguesdebarcelona.cat

Introducción y objetivo

Es bien conocido cómo varía la viscosidad del agua en función de la temperatura a la que se encuentre (Sotelo, 1995). También es conocido cómo varía la viscosidad del agua cuando se le añade un determinado compuesto soluble, como la sal (Applebey, 1910). Pero cuando se trata de conocer la viscosidad del agua con varios compuestos solubles ya no es tanta la literatura existente, sobre todo en el caso de concentraciones altas. Y si este mismo fluido contiene además material insoluble entonces es necesario medir experimentalmente su viscosidad (Gillies et al., 1991).

Este trabajo experimental forma parte de un estudio cuyo objetivo es analizar el comportamiento hidráulico en una tubería a presión de un tipo concreto de salmuera que contiene distintos compuestos salinos, además de un pequeño porcentaje de finos. Este análisis no se puede realizar sin al menos conocer el orden de magnitud de la viscosidad del fluido estudiado, ya que ésta es necesaria para el cálculo del número de Reynolds del flujo. Es para ello que se diseña y se construye un modelo hidráulico sencillo con el objetivo de calcular de forma indirecta el valor de la viscosidad de la salmuera, para distintos valores de concentración de la parte sólida. Por otro lado, también se ha usado un viscosímetro de Ostwald para calcular la viscosidad de las mismas muestras de salmuera con filtrado previo de los finos, lo que permitirá conocer el efecto de las partículas insolubles en la viscosidad de estas muestras.

Instalación experimental

El modelo consta de dos depósitos con rebosadero situados a la misma cota y conectados por dos tubos metálicos de diámetros diferentes. El rebosadero del segundo depósito es 10 centímetros más bajo que el del primero, para generar una diferencia de presiones controlada que provoque la circulación del fluido

contenido de un depósito a otro. Ambos rebosaderos están conectados a un depósito auxiliar para permitir su vaciado. En este depósito auxiliar hay una bomba sumergible que impulsa el líquido hacia el primer depósito, de forma que pueda mantenerse siempre lleno. Todas las conexiones cuentan con válvulas mariposa que permiten regular sus flujos, excepto en el caso de los tubos metálicos, donde el paso de flujo se regula con tapones roscados. Se han usado también bolsas de hielo selladas y una resistencia eléctrica para alcanzar y mantener una temperatura del líquido constante.

Metodología

El diseño del modelo hidráulico permite conocer con mucha precisión el valor de la pérdida de carga del flujo en su viaje del primer al segundo depósito, cuando ambos se encuentran llenos a rebosar. Esta pérdida de energía se reduce a la diferencia de cota entre los niveles de ambos depósitos, a lo que hay que sumar la pérdida de carga local en la salida del tubo, deducida usando tablas existentes en la literatura (Lencastre, 1998). Conocido este valor, se puede calcular la rugosidad absoluta de las tuberías fácilmente llenando los depósitos con un líquido de viscosidad conocida, en este caso agua destilada a una temperatura conocida, y midiendo el caudal circulante en situación de equilibrio. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la rugosidad son las de Darcy-Weisbach y Colebrook-White, tomando de incógnitas el coeficiente de fricción f y la rugosidad absoluta. Posteriormente, se llenan los depósitos con el fluido de viscosidad desconocida y se mide otra vez el caudal que circula en situación de equilibrio. Utilizando las mismas ecuaciones, pero en este caso considerando como incógnitas el coeficiente de fricción f y la viscosidad del fluido, se puede calcular el valor de esta

Obviamente este proceso debe realizarse de forma independiente para ambos tubos, y los resultados obtenidos para cada uno deben coincidir, ya que la viscosidad es una característica inherente al fluido.

Resultados

Se obtuvieron resultados de viscosidad para dos muestras de salmuera. La precipitación de sales alrededor del perímetro interior de los tubos del modelo no permitió realizar más ensayos. En la Figura 1 se muestran estos resultados, junto con los obtenidos con el viscosímetro de Ostwald para las mismas muestras filtradas.

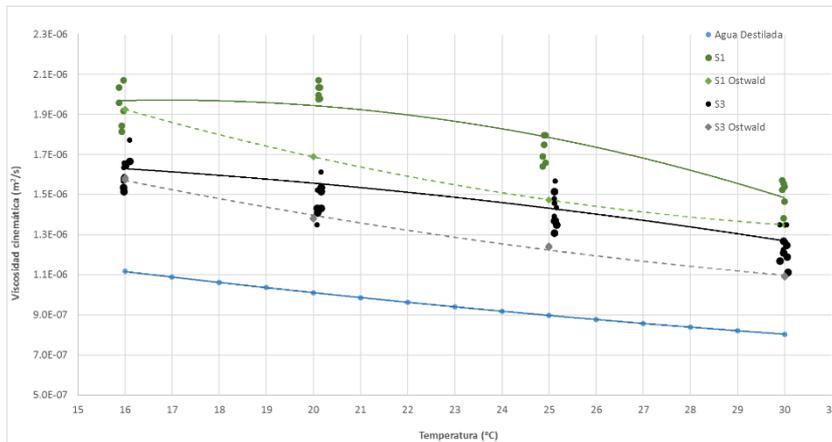


Figura 1. Medidas de viscosidad para las muestras de salmuera S1 (331 g/l) y S3 (261 g/l) filtradas (con viscosímetro Ostwald) y sin filtrar. Viscosidad del agua como referencia.

Referencias

Applebey, M.P., 1910. CCXI. The viscosity of salt solutions. Journal of the Chemical Society, Transactions, 97, pp.2000–2025.

Gillies, R.G., Shook, C.A. & Wilson, K.C., 1991. An improved two layer model for horizontal slurry pipeline flow. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 69(1), pp.173–178.

Lencastre, A.C. & Robles García, C., 1998. Manual de ingeniería hidráulica, Universidad Pública de Navarra.

Sotelo, G., 1995. Hidráulica general: fundamentos, Limusa.

LÍNEA PRIORITARIA C
RIESGO ASOCIADO A LA ESCORRENTÍA URBANA

Técnicas de medición del transporte de sedimentos en conducciones de saneamiento unitario

M. Regueiro-Picallo, J. Anta, J. Suárez, J. Puertas, A. Jácome, J. Naves

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

En las últimas décadas se han llevado a cabo numerosos estudios sobre el transporte de sedimentos, los cuales han derivado en distintas formulaciones. La diferencia entre estas formulaciones se debe a que se trata de un fenómeno complejo debido a la variabilidad en la procedencia de los sedimentos y a los procesos que controlan su interacción con el flujo (Banasiak y Tait, 2008). Estos estudios se han realizado principalmente en laboratorios con sedimentos parcialmente cohesivos o cohesivo-artificiales que no representan realmente las condiciones reales del sedimento. También se han llevado a cabo campañas experimentales en redes unitarias urbanas donde la mayor dificultad es el control de las variables de estudio. Para aportar un mayor conocimiento a los procesos de acumulación y arrastre de sedimentos en las redes de saneamiento unitario se ha planteado el proyecto “SEDUNIT” (Ref. CGL2015-69094-R) en el cual se están llevando a cabo varias campañas experimentales a distintas escalas (laboratorio, red urbana y modelización). En la fase inicial se han realizado varias series de ensayos en la plataforma de ensayos para conducciones con agua residual situada en la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Bens, en A Coruña (Figura 1). La principal ventaja de esta instalación es la posibilidad de reproducir el funcionamiento de una conducción de saneamiento unitario bajo unas condiciones controladas de laboratorio.

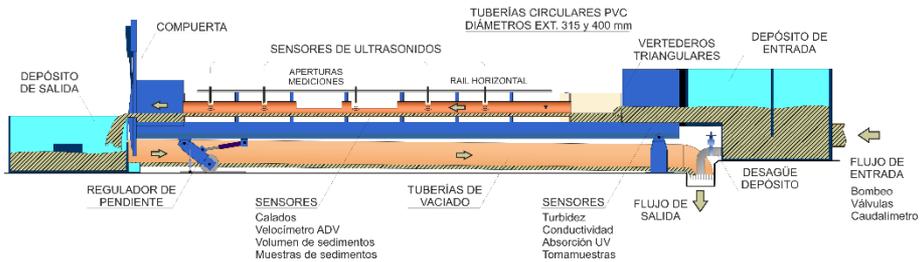


Figura 1. Perfil longitudinal de la plataforma de ensayos situada en la planta de pretratamiento de la EDAR de Bens (A Coruña).

En la primera campaña de ensayos, desarrollada en Regueiro-Picallo et al. (2017), se ha comparado la fase inicial de acumulación de sedimentos (7-11 días) para una conducción de PVC circular de 300 mm de diámetro interior y una ovoide de área equivalente. Para la siguiente campaña experimental se ha planteado un estudio de la evolución de los sedimentos hasta alcanzar la estabilización del lecho y, además, un análisis de la erosión de las partículas de fondo en dos tuberías circulares de 315 y 400 mm de diámetro exterior. Para estudiar la evolución de sedimentos de fondo se fijan valores constantes de caudal, calado y pendiente de las tuberías y se analizan el volumen de sedimentos acumulados y las propiedades físico-químicas en diferentes días. Una vez estabilizado el lecho se incrementa el valor del caudal y se comparan las propiedades del sedimento y la masa movilizada al final del ensayo para estudiar la erosión. Estos ensayos de erosión se repiten bajo las mismas condiciones de caudal y altura de sedimento inicial para diferentes tiempos de consolidación en el contorno de las tuberías.

Para medir el lecho de sedimentos se ha utilizado la técnica fotogramétrica *Structure From Motion* (SFM). La principal ventaja de esta metodología es la posibilidad de estudiar el volumen de partículas depositadas y la formación de estructuras de fondos a partir de fotos tomadas tras vaciar cuidadosamente las tuberías. Además, se han analizado las características físico-químicas de los dos tipos de sedimentos identificados en el contorno de ambas tuberías: depósitos de fondo y biopelículas de pared. Se ha prestado especial atención al análisis de las propiedades químicas de demanda química de oxígeno (DQO) y ratio de absorción de oxígeno (OUR, en inglés) puesto que están relacionadas con la resistencia del sedimento a la erosión.

En los primeros ensayos de larga acumulación se ha medido un crecimiento del sedimento de fondo lineal hasta el sexto día (16.5 g/m/h tubería 315 mm), a partir

del cual se ha obtenido una altura de sedimentos constante. Además, se ha registrado variaciones en las propiedades químicas del sedimento (DQO y OUR). La Figura 2a muestra que ambos valores disminuyen con el paso de tiempo, y que al compararlos con la masa movilizada en los ensayos de erosión para distintos tiempos de consolidación se obtiene un menor arrastre de sólidos cuando mayor es el tiempo de sedimentación en las tuberías. Este resultado indica que la evolución de las propiedades de los sedimentos afectan a su cohesión, cuanto mayor es el tiempo de consolidación en las tuberías mayor es la resistencia a la erosión de los sedimentos impidiendo su lavado. En los ensayos de erosión también se han analizado las formas de fondo a través de la técnica SFM. Al inicio del ensayo de lavado (menor caudal) el sedimento presenta una disposición dunar, mientras que después del ensayo de lavado (mayor caudal) el resultado son pequeñas formaciones dunares en el fondo de las tuberías (Figura 2b).

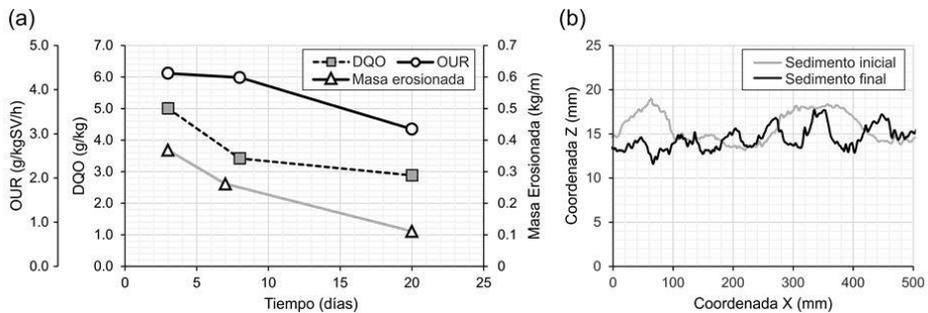


Figura 2. Evolución de las propiedades químicas y de la masa movilizada de sedimento en la tubería de 315 mm (a) y disposición de formas de fondo en la tubería de 400 mm (b).

Agradecimientos

Trabajo financiado por el MINECO y el programa FEDER a través de los proyectos "SEDUNIT" (Ref. CGL2015-69094-R) y "OVALPIPE II" (Ref. RTC-2016-4987-5). El trabajo de investigación de Juan Naves ha sido financiado por la beca FPU14/01778. Los autores también quieren agradecer tanto a las empresas EDAR Bens SA y ABN Pipe Systems como al trabajo de Montse Recarey por su colaboración durante la campaña experimental.

Referencias bibliográficas

Banasiak, R., Tait, S. 2008. The reliability of sediment transport predictions in sewers: influence of hydraulic and morphological uncertainties. *Wat. Sci. Tech.*, 57(9), 1317-1327.

Regueiro-Picallo, M., Naves, J., Anta, J., Suárez, J., Puertas, J. 2017. Monitoring accumulation sediment characteristics in full scale sewer physical model with urban wastewater. *Wat. Sci. Tech.*, in press, doi:10.2166/wst.2017.118

Incorporación de las lluvias locales y la incertidumbre en las condiciones de contorno en un modelo anidado regional-local de inundaciones

M. Bermúdez¹, J. C. Neal², P. D. Bates², G. Coxon², J. E. Freer², L. Cea¹, J. Puertas¹

¹ Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Universidade da Coruña.

² School of Geographical Sciences, University of Bristol, UK.

Los modelos hidráulicos de inundaciones requieren la definición de condiciones de contorno en los límites del dominio, generalmente un caudal de entrada y un nivel de lámina en la salida. Estos datos suelen ser obtenidos en estaciones de aforo de la red fluvial, donde los niveles de agua medidos se transforman en caudales mediante la aplicación de una curva de gasto. Las incertidumbres en las estimaciones de caudal y la no consideración de las contribuciones de las lluvias aguas abajo de las estaciones de aforo pueden tener un impacto significativo en los flujos estimados y, por consiguiente, en las predicciones de inundación.

En este estudio se propone un método para incorporar la incertidumbre en las curvas de gasto de las estaciones de aforo y las dinámicas locales de lluvia-escorrentía en las predicciones de un modelo de simulación de inundaciones (Figura 1). Como zona de estudio piloto se considera el tramo bajo del río Severn y la localidad de Worcester (West Midlands, Inglaterra). El caso de estudio es el evento de inundación del 20 de julio de 2017, que forma parte de una serie de inundaciones destructivas ocurridas en el Reino Unido durante ese verano. Además de medidas puntuales de nivel de lámina de agua, se dispone de una imagen SAR de la inundación para validar la metodología.

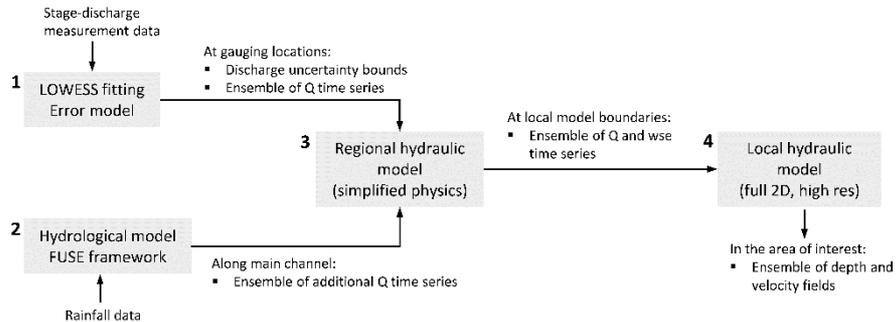


Figura 1. Esquema de la metodología propuesta: cuantificación de la incertidumbre en las curvas de gasto (1), modelo hidrológico (2) y modelo hidráulico anidado regional (3) - local (4).

La incertidumbre en las curvas de gasto se cuantifica mediante una regresión no paramétrica localmente ponderada de las medidas de nivel de lámina-caudal en dos estaciones de aforo. La transformación lluvia-escorrentía se simula mediante un modelo hidrológico conceptual semidistribuido, considerando la incertidumbre tanto en la estructura como en los parámetros del modelo. Como dato de entrada se imponen las precipitaciones registradas aguas abajo de las estaciones de aforo mencionadas anteriormente, cuantificando así los flujos adicionales generados por estas lluvias locales a lo largo del cauce principal. A continuación se aplica un modelo hidráulico regional (LISFLOOD-FP) para combinar estas contribuciones y generar un conjunto de series temporales de caudal y de nivel de lámina de agua en los contornos de un modelo hidráulico local (Iber). Finalmente, se evalúa el efecto de las dinámicas de lluvia y la incertidumbre en las condiciones de contorno en las predicciones del modelo local. En la Figura 1 se muestra el esquema completo de la metodología.

Los resultados muestran cómo es necesario considerar la incertidumbre en las condiciones de contorno y el proceso lluvia-escorrentía para una correcta caracterización de los caudales e inundaciones derivadas de los mismos en ciertos eventos de intensa precipitación. Así, la incorporación de estas contribuciones mejora las predicciones del modelo tanto en lo que respecta a los niveles de inundación máximos como a los tiempos en los que se producen. Asimismo, se demuestra que el uso de un modelo local anidado en un modelo regional es una forma computacionalmente eficiente de producir predicciones detalladas de inundación en una zona urbana cuando no se dispone de estaciones de aforo próximas.

Agradecimientos

María Bermúdez agradece a la Xunta de Galicia la concesión de su contrato postdoctoral (referencia ED481B 2014/156-0).

Montaje de un simulador de lluvia mediante goteros para estudios de drenaje urbano

J. Naves, J. Anta, J. Puertas, J. Suárez, M. Regueiro

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

El uso de simuladores de lluvia en estudios de drenaje urbano y erosión de suelos (tanto en laboratorio como en campo) permite incrementar el control sobre las variables que caracterizan una precipitación, haciendo posible simular y replicar lluvias de diferentes intensidades, tamaños de gota y duraciones. A pesar de estas ventajas, la dificultad para replicar de manera precisa las características de la lluvia real, hace que se hayan desarrollado numerosos diseños (Kathiravelu et al., 2014) sin que ninguno de ellos se presente como una solución idónea. En este trabajo se presenta el montaje y la calibración de un nuevo simulador de lluvia mediante goteros diseñado para su utilización en el estudio del lavado y transporte de sedimentos en un modelo físico de una cuenca urbana (Naves et al., 2016), situado en el laboratorio de hidráulica del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC). En la Figura 1 se incluyen dos imágenes en las que se muestra el nuevo simulador sobre el modelo de laboratorio y un detalle de las cuadrículas de goteros que generan las gotas de lluvia.



Figura 1. Simulador de lluvia sobre el modelo físico de un tramo de calle a escala real y detalle de los goteros que generan las gotas.

El simulador cubre una superficie de 36 m² siendo capaz de generar tres intensidades de lluvia de 30, 50 y 80 mm/h mediante dos cuadrículas intercaladas de goteros de 1.2 y 2 L/h respectivamente, con una separación entre ellos de 20 cm. Los goteros se han elegido autocompensantes de manera que el caudal se mantenga constante con las posibles variaciones de presión. Las gotas generadas por estos goteros son uniformes y de un diámetro superior al tamaño medio de gota de una lluvia real. Con el objetivo de romper estas gotas y distribuir la lluvia de la manera más homogénea posible, se dispone bajo los goteros una malla horizontal. La luz de la malla, la distancia entre los goteros y la altura total a la que se sitúa el simulador se presentan como los principales parámetros a calibrar para la obtención de una lluvia lo más real posible.

Además de la uniformidad y de la intensidad de lluvia, en el proceso de lavado de contaminantes de superficies impermeables cobra una especial importancia el tamaño y la velocidad con la que las gotas de lluvia impactan en la superficie provocando la suspensión de las partículas para su posterior transporte. Por ello se ha utilizado un disdrómetro óptico por láser Parsivel 2 (OTT Hydromet), además de pluviómetros, para caracterizar las lluvias simuladas con diferentes luces de malla y distancias entre los goteros y la malla. Los resultados obtenidos muestran que este simulador de lluvia consigue un control elevado sobre la uniformidad e intensidad de la lluvia. Por otro lado los tamaños y velocidades de las gotas generadas se han comparado con datos de lluvias reales registrados en la azotea del centro (Figura 2). Se puede comprobar que, aunque no se generan gotas mayores a 2 mm, el tamaño medio de gota generado por el simulador está dentro del rango de una lluvia real. Sus características hacen que este simulador se presente como idóneo para instalaciones fijas de laboratorio en los que se disponga de suficiente altura sobre el modelo físico para que las gotas impacten en la superficie con una velocidad igual a la terminal, como sucede en una precipitación real.

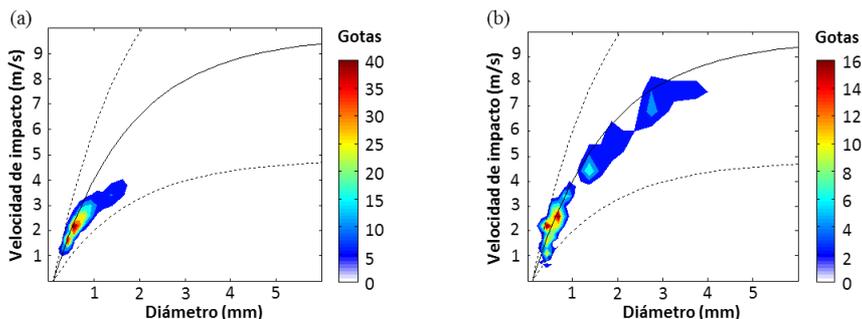


Figura 2. Distribución de tamaños y velocidades de gotas del simulador (a) y de una lluvia real (b), para una intensidad de precipitación de 30 mm/h. La línea sólida corresponde con la relación experimental entre el diámetro y la velocidad terminal obtenida por Atlas et al. (1973).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiada 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

Kathiravelu G., Lucke T., Nichols P. 2014 Designing the Perfect Rainfall Simulator for Urban Stormwater Studies: An Impossible Dream? In Proceedings of the 13th International Conference on Urban Drainage (pp. 1-9). International Water Association.

Laws J.O. 1941 Measurements of the fall-velocity of water-drops and raindrops. Eos, Transactions American Geophysical Union, 22(3), 709-721.

Naves J., Jikia Z., Anta J., Puertas J., Suárez J., Regueiro-Picallo M. 2016 Experimental study of pollutant washoff on a full-scale street section physical model. 8th International Conference on Sewer Processes and Networks, August 31 –September 2, Rotterdam (The Netherlands).

Estudio de las Descargas de Sistemas Unitarios (DSUs) durante episodios de lluvia en la ciudad de Murcia

J. T. García, P. Espín-Leal, A. Viguera-Rodríguez, L. G. Castillo, J. M.^a Carrillo

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

P. D. Martínez-Solano, Simón Nevado-Santos

Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia SA, Plaza Circular 9, Murcia.

La mayoría de los sistemas de saneamiento existentes en España y Europa, al igual que en la ciudad de Murcia, son unitarios. En este tipo de redes circulan por una misma conducción las aguas residuales generadas por la actividad humana comercial e industrial de las ciudades, en tiempo seco, junto con las aguas generadas por la escorrentía en la superficie de las ciudades de las aguas que provienen de un suceso de lluvia. Dichas redes unitarias, en el caso de recibir una lluvia de carácter torrencial inusual, no serán capaces de transportar la totalidad de los caudales recogidos a lo largo de las ciudades y sufrirán el fenómeno de desbordamiento que se denomina, en este caso, Descarga de Sistema Unitario (DSU).

Con la aprobación del Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre, se establecieron las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas contemplando el hecho de que hasta la fecha no existiera una normativa específica que regulara los desbordamientos de los sistemas de saneamiento en episodios de lluvia. De esta forma se incorporan al Reglamento de Dominio Público Hidráulico artículos que permiten limitar la contaminación producida por dichos desbordamientos, reconociendo que en la práctica no es posible construir los sistemas colectores y las instalaciones de tratamiento de manera que se puedan someter a tratamiento la totalidad de las aguas residuales en circunstancias tales como lluvias torrenciales inusuales. Dentro de este contexto, el conocimiento de las curvas de variación de concentración para un determinado contaminante (lo que se conoce como polutogramas) es fundamental a la hora de aplicar las medidas citadas en el Real Decreto 1290/2012.

El presente trabajo recoge un estudio de los flujos de contaminación movilizados durante el tiempo de lluvia en un sistema de saneamiento y drenaje unitario de dos cuencas urbanas situadas en el sureste de España, más exactamente en la

ciudad de Murcia. Con el propósito de estudiar y profundizar en el conocimiento de la movilización de contaminación en ambas cuencas se realiza, en primer lugar, el cálculo de los hidrogramas, polutogramas e hietogramas de un conjunto de episodios de estudio.

Por medio del empleo de un modelo numérico de la red, se obtienen los hidrogramas asociados a cada uno de los episodios analizados en base a los hietogramas aportados por las estaciones pluviométricas de ambas cuencas. En cuanto a los contaminantes, se han obtenido el conjunto de polutogramas tomando como base las medidas de turbidez en ambos puntos de estudio.

Obtenidos los datos que permiten caracterizar el evento en cuanto a sus propiedades hidráulicas, hidrológicas y contaminantes, se puede proceder al estudio de las relaciones entre sus distintos parámetros característicos como pueden ser: la precipitación total, el periodo seco precedente, etc., con el objetivo de establecer herramientas de predicción que permitan mejorar las labores de gestión y operación de la red durante los sucesos tormentosos.

Tomando como base los parámetros hidráulicos, hidrológicos y contaminantes de 19 lluvias (10 en la cuenca denominada S1 y 9 en la cuenca San Félix), se han elaborado dos índices de predicción (Figura 1) que facilitan la obtención de los dos parámetros principales de un polutograma: el tiempo al pico de la turbidez (TPP) y el valor máximo de turbidez (C_{maxtb}).

Índice de tiempo al pico del polutograma

$$I_{TPP} = \left(\frac{T_{PH}}{T_C} \right)^{0.13} \cdot (P_{Total})^{0.02}$$

Donde:

- T_{PH} : tiempo al pico del hidrograma (min)
- T_C : tiempo de concentración de la cuenca (min)
- P_{total} : precipitación total (mm)

Índice de concentración máxima

$$I_{CMax} = (P_{Total} \cdot i)^{0.3} \cdot (P_{seco})^{0.3} \cdot F_{forma}$$

Donde:

- P_{total} : precipitación total (mm)
- P_{seco} : días de tiempo seco precedentes (días)
- F_{forma} : factor de forma de la cuenca
(10·Área)/(L.cauce²)

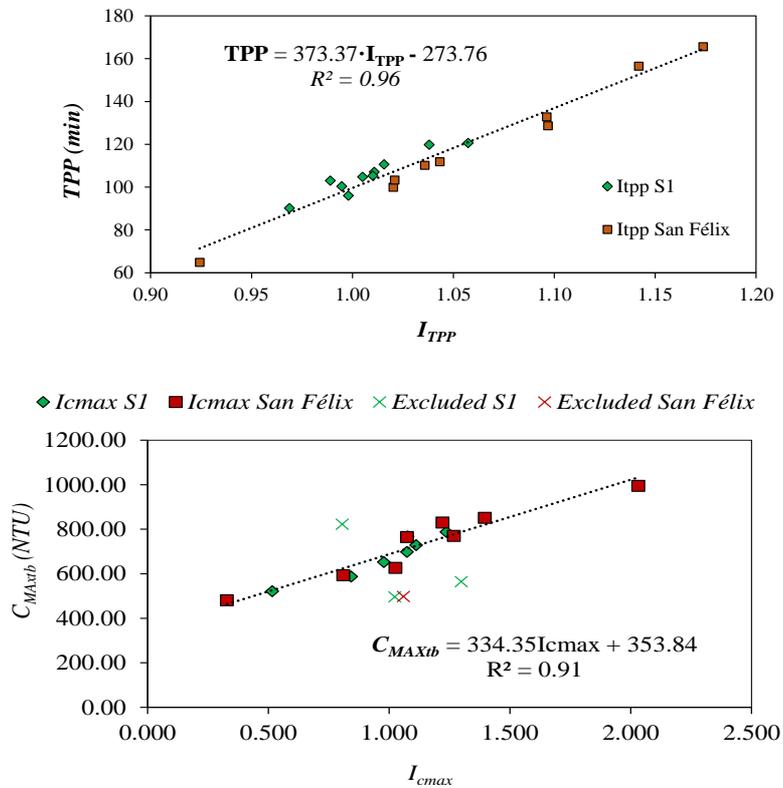


Figura 1. Ajuste estadístico de los índices de predicción de contaminación.

Por medio de la predicción de los valores de turbidez máxima y tiempo al pico de dicha turbidez se presenta una metodología de construcción de polutogramas de diseño que permiten el cálculo de la turbidez a lo largo de cualquier evento de lluvia por medio de información de la cuenca y datos de precipitación y caudal de aplicación a las dos cuencas de estudio de la ciudad de Murcia.

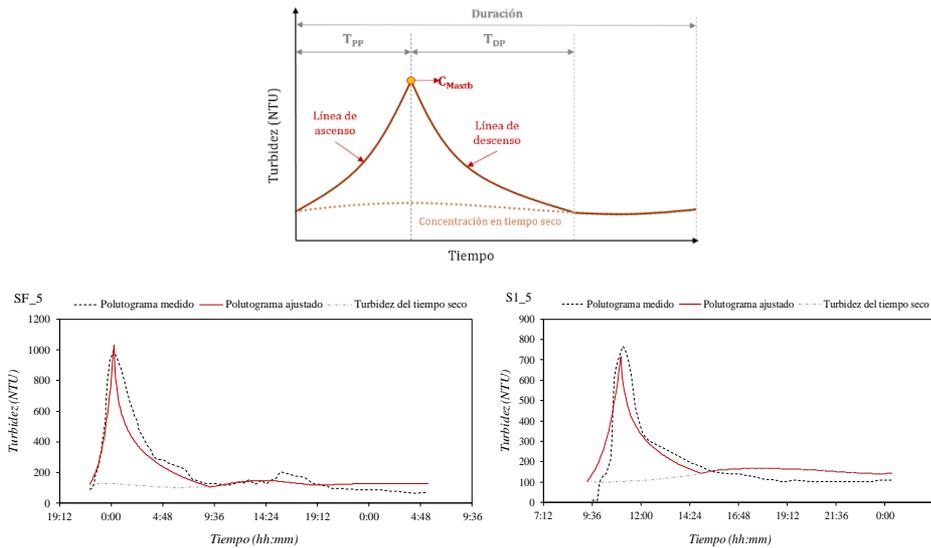


Figura 2. Forma del polutograma de diseño y ajuste a un episodio real para el caso del episodio 5 en las cuencas San Félix y S1.

Referencias

Bersinger, T., Pigot, T., Bareille, G., Le Hecho, I. 2013. Continuous monitoring of turbidity and conductivity: a reliable, easy and economic tool for sanitation management. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 171, 151–162.

Del Río Cambeses, H. 2011. Estudio de los flujos de contaminación movilizados en tiempo de lluvia y estrategias de gestión en un sistema de saneamiento y drenaje unitario de una cuenca urbana densa de la España Húmeda. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña.

Gupta, K., Saul, A. J. 1996. Specific relations for the first flush load in combined sewer flows. Water research, 30(5), 1244-1252.

Comparación numérico-experimental de la captación de agua de lluvia mediante rejillas transversales continuas

J. Téllez Álvarez	<code>jackson.david.tellez@upc.edu</code> .
M. Gómez Valentín	<code>manuel.gomez@upc.edu</code> .
A. Paindelli	<code>andrea.paindelli01@universitadipavia.it</code> .
B. Russo	<code>brusso@unizar.es</code> .

La escorrentía superficial producida durante los eventos de tormenta debe ser transmitida al sistema de alcantarillado en puntos específicos a través de un correcto diseño del sistema de drenaje urbano para evitar inundaciones y garantizar la circulación de personas y coches en las calles.

En el medio urbano, aparte de las superficies conectadas directamente a la red de drenaje de la ciudad como terrazas y tejados de edificios, y calles y aceras en las cuales contamos con rejillas convencionales para garantizar la captación de escorrentía superficial, hay toda una serie de superficies como plazas, grandes viales peatonales, superficies aeroportuarias, zonas ajardinadas, etc. En estos casos, colocar rejillas convencionales en la superficie urbanizada representa una solución de escasa eficacia en términos de captación superficial y por eso se suelen utilizar estructuras de captación continuas formadas por el conjunto de rejillas y canaletas de desagüe asociadas.

El objeto de este trabajo es la comparación de la eficiencia hidráulica de las rejillas transversales continuas entre los resultados obtenidos a través de campañas experimentales previas, con un modelo numérico realizado en FLOW 3D que representa muy bien el comportamiento del flujo.

Tanto los ensayos como la modelación numérica se desarrollaron en un modelo a escala 1:1 utilizando la plataforma de imbornales del laboratorio de hidráulica de la UPC. En particular se limitó el área de circulación del flujo a un ancho de 1.5 m y se estudió el funcionamiento hidráulico de las rejillas para un rango de caudales entre 0 y 100 l/s y un rango de pendientes longitudinales entre 0 y 10% sin bombeo transversal (Figura 1).



Figura 1. Zona de ensayo experimental para rejillas transversales continuas.

El modelo numérico desarrollado es un modelo híbrido 2D/3D y anidado, considerando un esquema 2D en la zona de aproximación del flujo en la plataforma, y un esquema 3D en las cercanías del sumidero, lo cual nos permite ganar tiempo de cálculo. Se utiliza un programa basado en volúmenes finitos que resuelve las ecuaciones tipo RANS, el cual consta de 3 bloques de malla. El ordenador utilizado fue un i7 de memoria RAM de 14 GB. A priori, la geometría fue construida en el programa SketchUp, exportado en formato STL al FLOW3D. El tiempo de simulación oscila entre 3 y 5 días.

Se ha considerado el tanque de almacenamiento lleno como condición inicial, con el fin de acelerar el tiempo de cálculo. Dentro del tanque de almacenamiento se colocó una fuente de masa como la condición de entrada de flujo, y la condición de salida se colocó en la reja y al final de la plataforma. La rugosidad fue utilizada como parámetro de calibración inicial del modelo, comparando los caudales captados tanto para un ancho de 1.5 metros, como para un metro lineal de reja, además del calado aguas arriba de la misma (Figura 2 y 3).

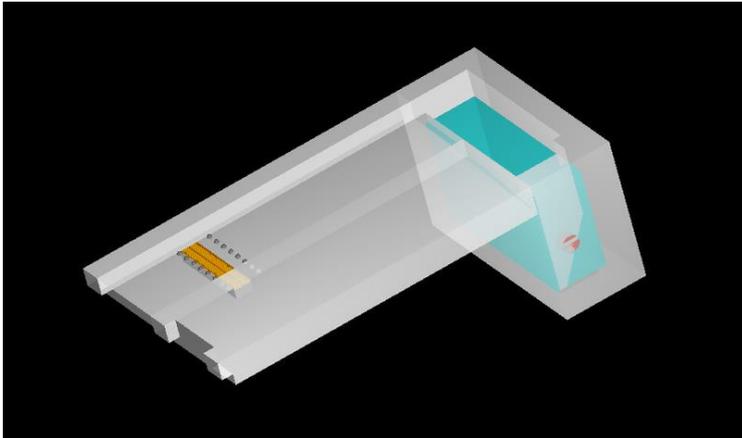


Figura 2. Esquema de modelo numerico en FLOW 3D.

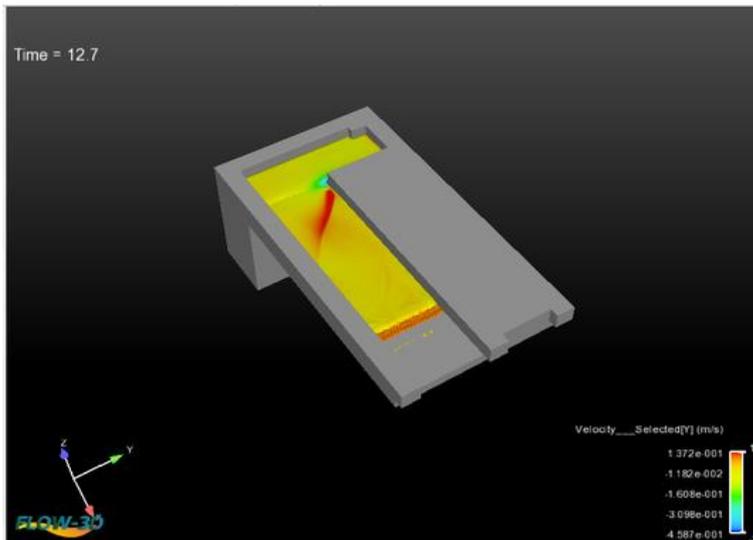


Figura 3. Simulacion numerica en FLOW 3D.

Estudio numérico y experimental del flujo de salida de la red de alcantarillado a través de los imbornales

M. Gómez Valentín¹, A. González Alvarado ¹, J. Téllez Alvarez¹

¹ *Instituto FLUMEN. (UPC-CIMNE) ETSICCP de Barcelona. manuel.gomez@upc.edu.*

Introducción y objetivos

El Estudio de los problemas de inundación en medio urbano se enfoca cada vez más hacia el concepto de drenaje dual, estudiando de manera conjunta la dinámica de la red de alcantarillado enterrada, drenaje subterráneo, y la de la red de calles de la población, drenaje superficial. La conexión entre los dos niveles se realiza mediante el sistema de captación, encargado en los primeros momentos del suceso de lluvia de captar e introducir el agua de la calle en la red de alcantarillado. Pero si la lluvia es muy intensa, la red enterrada puede entrar en carga y expulsar caudales hacia la superficie, proceso que se realiza a través de los mismos imbornales.

Se han desarrollado diferentes formulaciones para estudiar el flujo de entrada calle – red, como la propuesta por el HEC-22, la desarrollada en Flumen, etc. Sin embargo son todavía muy escasas las contribuciones sobre el proceso de salida desde la red, cuando la red entra en carga y su nivel de presión llega al nivel de la calle.

En este trabajo se desarrolla un estudio en modelo físico a escala real, 1:1, modificando la plataforma de ensayos disponible en el Laboratorio de Hidráulica de Barcelona. Previamente a la realización de la campaña de ensayos se ha estudiado en modelo numérico 3D mediante el software comercial Flow3D el comportamiento del flujo de salida a través de un sumidero habitual de la ciudad de Barcelona.

Modelo numérico en 3D

Se ha establecido el modelo de la plataforma, el sumidero, la caja de imbornal y el conducto de conexión sumidero – red, mediante una discretización de hexaedros de 1 cm. en la zona del sumidero y de 2 cm. en el resto de la plataforma. Se han analizado los comportamientos de caudales de salida de 10 a 50 l/s. Caudales superiores supondrían ya un desbordamiento de la plataforma y la inundación del laboratorio.

Las aproximaciones más usualmente usadas por los pocos trabajos realizados sobre el tema es asumir el funcionamiento de salida del sumidero como un orificio, caracterizado por el área del mismo, igual al área de huecos, y por un coeficiente de desagüe. La mayoría de usuarios de software comercial tipo MIKE-URBAN, InfoWorks u otros consideran valores de coeficiente de desagüe tipo, del orden de 0.6 igual al empleado para orificios de tipo circular. Sin embargo no está comprobado que estos valores sean correctos. En una primera campaña hemos simulado la hidráulica del sumidero en carga, considerando su funcionamiento hidráulico:

$$Q = C_d A_{\text{huecos}} \sqrt{2gh}$$

Siendo “h” el nivel de agua sobre la reja. De los resultados observados con el modelo 3D, el nivel de agua no es constante ni mucho menos por lo que se adoptó un criterio de calado medio, con el que se obtiene el coeficiente de desagüe correspondiente. Los resultados numéricos muestran que el valor de Cd no es 0.6, sino que se encuentra en valores del orden de 0.2 a 0.3 como máximo. Estamos trabajando también con los mismos datos asumiendo funcionamiento tipo vertedero, la otra opción adoptada por algunos usuarios de software comercial pero aún no tenemos los resultados disponibles.

Modelo físico de salida de agua por el sumidero

El modelo de laboratorio se puede apreciar en la figura adjunta. La instalación permite el funcionamiento inicial, entrada de agua desde la calle a la red a través del sumidero, y se ha modificado para que permita la salida de agua hacia la calle cuando entra en carga. El caudal de salida se regula por un sistema de válvulas y se mide mediante un caudalímetro electromagnético. La capacidad de la instalación daría hasta un caudal de salida cerca de los 100 l/s pero nos limitamos a 50 l/s para evitar problemas en el laboratorio. La medida de niveles de agua sobre el sumidero se realiza con limnómetro tradicional. Tenemos un protocolo inicial de 30 puntos de medida que se puede reducir según el caso de estudio. En ocasiones, sobre todo en caso de pendiente del terreno fuerte, superior al 4%, el agua no sale a través de todo el sumidero y algunos agujeros están al aire. Verificaremos la influencia que tiene sobre el valor del coeficiente de desagüe.



Figura 1. Plataforma de ensayos y detalle de la caja del sumidero.

LÍNEA PRIORITARIA D

SEGURIDAD DE PRESAS. ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS

Modelación numérica del desagüe de medio fondo rehabilitado de la Presa de Bárcena

D. López Gómez, T. Ramos del Rosario, J. J. Rebollo Cillán

Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).

david.lopez@cedex.es; tamara.ramos@cedex.es ; juan.j.rebollo@cedex.es

La presa de Bárcena sita en el río Sil, aguas arriba de Ponferrada, dispone de un desagüe de medio fondo constituido por un vano de 10 m de ancho regulado con una compuerta. La excesiva capacidad de alivio de este órgano, 1170 m³/s con el embalse a la cota 620.00 (NMN), unido a la dificultad de maniobra de la compuerta y la existencia de otros desagües alternativos como son la central hidroeléctrica y el aliviadero de emergencia, han llevado al desuso de éste.

CEDEX (1996) estudió en modelo físico un conjunto de modificaciones para mejorar las condiciones de operatividad y limitar su capacidad de desagüe.

La Confederación Hidrográfica del Miño-Sil, dentro del marco de una obra de emergencia, ha implementado algunas de las modificaciones que se estudiaron en el informe de 1996, con el fin de volver a poner en operación este órgano de desagüe. Se ha dividido el canal de descarga en dos rápidas mediante la disposición de un cajero central. Sin embargo, no se ha rebajado el dintel superior por las dificultades técnicas que planteaba su construcción.



Figura 1. Presa de Bárcena. Desagüe de medio fondo. Situación inicial y solución propuesta.

La Confederación solicitó la asistencia técnica del CEDEX para comprobar el funcionamiento hidrodinámico de la embocadura. Como consecuencia de este estudio numérico, calibrado con el modelo físico, se comprobó que el flujo aguas arriba de la embocadura con las modificaciones propuestas era adecuado, sin que existiera riesgo de la formación de remolinos de eje vertical. Este estudio numérico evidenció que el flujo en el canal de descarga tenía tendencia al despegue y a generar penachos por efecto de la reacción con los contornos.

Durante las primeras pruebas en prototipo de la solución construida se comprobó la existencia de los penachos y despegues en el canal de descarga.

La geometría estricta de la obra ejecuta se facilitó al CEDEX con el fin de reproducir su funcionamiento hidrodinámico y proponer medidas correctoras del diseño que mejoren este funcionamiento.

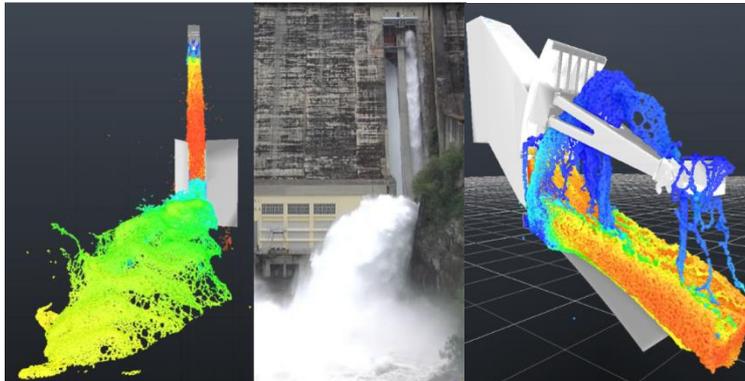


Figura 2. Esquema del aliviadero.

Los últimos trabajos de simulación numérica tridimensional muestran que las ranuras de aireación dispuestas aguas abajo de cada compuerta, están situadas en la zona de expansión lateral del chorro por lo que no airean y además, suponen un obstáculo al flujo que produce un penacho que impacta sobre los brazos de la compuerta. Así mismo se observa que al carecer del rebaje del dintel aguas arriba de la compuerta, el flujo no sale bien guiado e impacta sobre la solera favoreciendo el despegue de lámina.

Se ha recomendado la eliminación de las ranuras pues evita la formación del penacho. Así mismo se recomienda operar con aperturas de compuerta limitadas para evitar el deterioro a largo plazo de los canales de descarga.

Referencias bibliográficas

CEDEX (1996). Informe técnico del ensayo en modelo reducido del aliviadero sumergido de la presa de Bárcena.

CEDEX (2014). Informe Técnico del estudio en modelo matemático del aliviadero de medio fondo de la presa de Bárcena.

López. D. (2015) Estudio hidráulico con modelación numérica de la rehabilitación del desagüe de medio fondo de la presa de Bárcena. Jornadas Españolas de Presas. SPANCOLD. Sevilla. España. Actas del Congreso.

Medidas para la caracterización de flujos emulsionados

J. J. Rebollo Cillán; D. López Gómez, R. Herrero Santos, T. Ramos, L. Garrote

Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).

juan.j.rebollo@cedex.es; david.lopez@cedex.es; ricardo.herrero@cedex.es;

tamara.ramos@cedex.es; luis.garrote@upm.es.

El Laboratorio de Hidráulica del CEDEX está realizando actualmente una investigación sobre la influencia de la aireación en rápidas y cuencos de resalto cuyo objeto es analizar y caracterizar estos efectos a gran escala. La primera fase de la investigación se centra 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.

Entre los diferentes mecanismos que influyen en la disipación de energía en rápidas, uno de los principales es el frenado por fricción de contornos. Entre las expresiones para cuantificar este efecto, la más extendida es la fórmula de Manning (1889). Esta ecuación representa la pendiente de fricción en base al coeficiente n :

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

Uno de los objetivos globales del estudio es analizar la influencia de la aireación en el número n y caracterizar su evolución con diferentes concentraciones, ya que, en el flujo en rápida, con láminas de poca entidad debido a la velocidad, parece que la fricción será preponderante.

Para llevar a cabo la experimentación y analizar el efecto, 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.

En cuanto a la concentración, se están planteando diferentes alternativas para determinar su valor para cada escenario. El primero de ellos consiste en tomar una muestra de flujo emulsionado de forma continua a través del tubo Pitot y conducirla a un depósito de decantación en el que se separa y afora el caudal de aire y agua. Este método sólo permite tomar los valores hasta un determinado calado, ya que la presión en el Pitot disminuye en este punto y los resultados no son representativos.



Figura 3. Sistema de medida de concentración de aire.

El segundo método consiste en el análisis fotográfico para cada escenario. Para ello, se toma una fotografía escalada y se analizan las bandas de los resultados (RGB), trasladando los valores de concentración a todo el perfil. La figura 4 muestra las relaciones obtenidas tanto por el decantador como por el análisis fotográfico para un caudal de agua de 155 l/s y sin aporte adicional de caudal de aire.

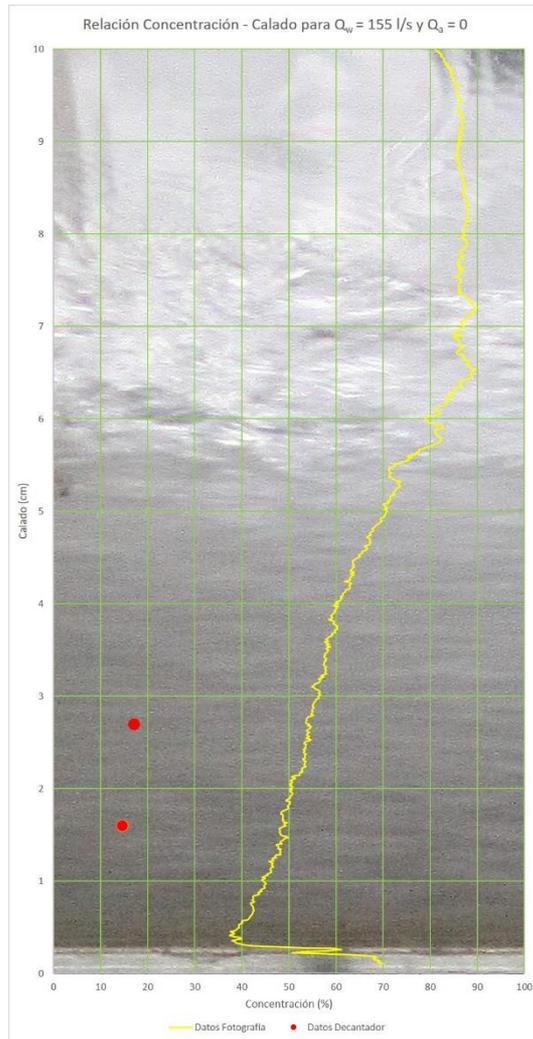


Figura 4. Campo vertical de concentraciones para una caudal de agua de 150 l/s sin aporte adicional de aire.

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).

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

Análisis del parámetro de turbulencia inicial en el vertido libre de presas de fábrica

L. G. Castillo, J. M.^a Carrillo

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

En los últimos años, el incremento en la magnitud de las avenidas de diseño ha promovido la reevaluación de la capacidad de los aliviaderos y escenarios de operación para las grandes presas en todo el mundo. Puesto que la capacidad de muchos aliviaderos es inadecuada, existe la posibilidad real de que las presas puedan ser desbordadas, creándose así nuevos escenarios de carga para las presas (Wahl et al. 2008, FEMA 2014).

En la caracterización del flujo vertiente, se requiere definir dos tipos de variables: las condiciones iniciales del flujo de vertido y las condiciones del flujo incidente aguas abajo.

Las condiciones iniciales corresponden a las características del flujo justo cuando el chorro abandona el aliviadero. En el caso de una presa bóveda (inclined crest), $z = -h$, donde z es la coordenada vertical con origen en la cresta del aliviadero, y h es la carga del aliviadero. Similarmente, en el caso de una presa de gravedad (flat-topped), se considera también $z = -h$.

Las condiciones incidentes corresponden a la sección del chorro antes del impacto con la superficie de aguas abajo. Así, se debe definir la velocidad media, V_j , y el espesor del chorro incidente, B_j (ver Figura 1). El espesor del chorro debe incluir el espesor básico debido a la gravedad B_g , y el ensanchamiento lateral del chorro, debido a los efectos de la aireación y turbulencia, ξ (Castillo et al. 2015):

$$B_j = B_g + 2\xi = \frac{q}{\sqrt{2gH}} + 4\varphi\sqrt{h}(\sqrt{2H} - 2\sqrt{h}) \quad (1.a)$$

donde q es el caudal específico, H la altura de caída y h es la carga de energía en la cresta del aliviadero. $\varphi = K_\varphi T_u$, siendo T_u la intensidad de turbulencia (0.012 para presas bóveda (inclined crest) y 0.013 para una presa de gravedad (flat-topped) y K_φ un parámetro experimental (1.14 para chorros circulares, 1.24 para el vertido libre tridimensional (nappe flow o inclined crest) y 1.20 para el caso de desbordamiento en una presa de gravedad (flat-topped)).

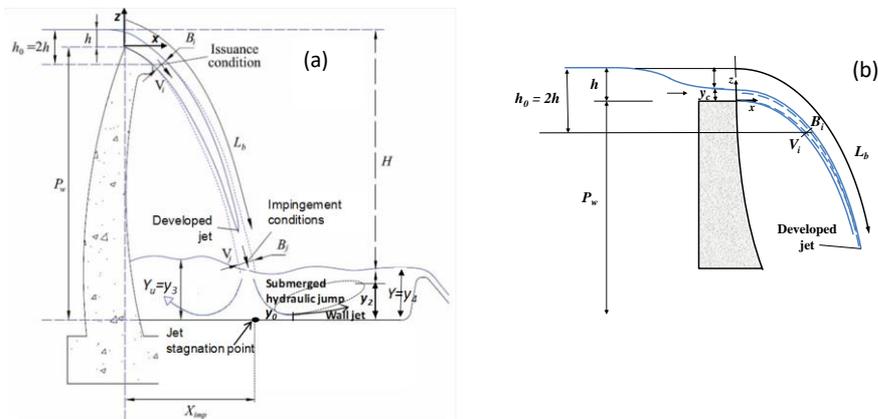


Figura 1. Esquema del vertido libre y del cuenco de recepción.
(a) Presa bóveda (b) Presa de gravedad.

Castillo et al. (2015) establecieron diferentes ecuaciones para calcular la disipación de energía en el aire y en el colchón de agua, como una función de las relaciones Y/B_j y H/L_b . Y y H son el calado y la carga total de energía a la salida del colchón de agua y L_b es la longitud de rotura del chorro en el aire. Se propuso la siguiente expresión para estimar la longitud de rotura:

$$\frac{L_b}{B_i F_i^2} = \frac{K}{(\varphi F_i^2)^{0.82}} \quad (1.b)$$

donde B_i y F_i son el espesor del chorro y el número de Froude en las condiciones iniciales. K es un coeficiente de ajuste (presa bóveda = 0.85). Si en la expresión (1.b) reemplazamos el espesor del chorro $B_i = q / V_i$; velocidad $V_i = 2\sqrt{gh}$; caudal específico $q = h^{3/2} C_d$; número de Froude $F_i = V_i / \sqrt{g B_i}$ y, resolvemos para la longitud de rotura, entonces se obtiene que:

$$L_b = \frac{C_d^{0.82} h^{0.73}}{2g^{0.68} \varphi^{0.82}} K \quad (1.c)$$

C_d es el coeficiente de descarga (2.1 y 1.7 para presas bóveda y gravedad, respectivamente).

La Fig. 2a indica un análisis de sensibilidad del coeficiente K para un índice de turbulencia $T_u = 0.013$ (flat-topped). Podemos observar que para $K = 1$, la

longitud de rotura es muy similar al caso de inclined crest ($T_u = 0.012$ y $K = 0.85$). Puesto que el índice de turbulencia debería ser algo mayor, entonces parece razonable que la longitud de desintegración sea menor. De esta forma se establece $K = 0.95$. La Fig. 2b nos confirma que en el caso de una presa de gravedad (flat-topped) las condiciones iniciales corresponden a $T_u = 0.013$ y $K = 0.95$.

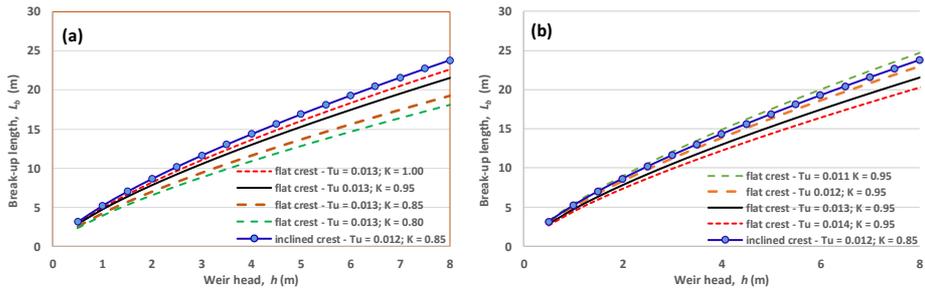


Figura 2. Longitud de rotura en función de la carga del aliviadero en el caso de presas bóveda y de gravedad.

La Fig. 3 muestra el análisis de sensibilidad para el parámetro K_ϕ en función de la relación H/h y $T_u = 0.013$. El término de expansión del chorro para la presa de gravedad ($T_u = 0.013$ y $K_\phi = 1.14$) es igual al caso de la presa bóveda ($T_u = 0.012$ y $K_\phi = 1.24$). Sin embargo, el término de expansión del chorro debería ser ligeramente mayor para el caso de una presa de gravedad, así que se estableció $K_\phi = 1.20$ (valor intermedio entre un chorro circular, $K_\phi = 1.14$ y un vertido libre tridimensional en una presa bóveda (nappe flow), $K_\phi = 1.24$).

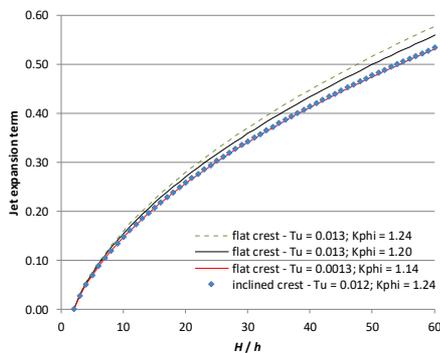


Figura 3. Expansión del chorro en función de la relación H/h y del parámetro K_ϕ .

Referencias bibliográficas

Castillo, L. G, Carrillo, J. M.^a and Blázquez, A. (2015). "Plunge pool dynamic pressures: a temporal analysis in the nappe flow case." *J. Hydraulic Res.*, 53(1), 101-118.

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

Wahl, T. L., Frizell, K.H. and Cohen, E. A. (2008). "Computing the trajectory of free jets." *J. Hydraul. Eng.*, 134(2), 256-260.

Análisis de los factores con mayor influencia en la erosión de salida de obras de drenaje transversal

A. Galán, J. González, S. Díaz

ETSI Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Castilla-La Mancha. Avda. Camilo José Cela, s/n. 13071 - Ciudad Real.

Las Obras de Drenaje Transversal (ODT) situadas bajo infraestructuras lineales para dar continuidad a las corrientes naturales, suponen en muchas ocasiones cuando menos un cambio en las condiciones de flujo con respecto de las condiciones en el curso fluvial que conecta. En general se produce una contracción de la sección, y las velocidades aumentan, lo que da lugar a un aumento de nivel aguas arriba, para acumular el nivel de energía adicional necesario para atravesar la ODT, que se traduce en un aumento de la velocidad durante el tránsito a través de la ODT, y con ello la necesidad de disipar dicha energía a la salida de la ODT y restitución al régimen natural. En este proceso de expansión del flujo y pérdida de velocidad a la salida, se pueden producir procesos de erosión local cuando el material presente en el entorno no tenga capacidad para soportar las tensiones de arrastre producidas en el fenómeno.

El presente trabajo busca identificar aquellos factores involucrados que mejor explican la magnitud del proceso de erosión local a la salida de una ODT. El análisis se realiza mediante una aproximación experimental en ODT de un único conducto, situándose a la salida material granular no cohesivo, a partir del ensayo físico del conjunto de combinaciones que producen distintas condiciones de nivel aguas arriba y aguas abajo de la ODT, tipología de sección del conducto, disposición o no de aletas, y la presencia o no de una obstrucción parcial del conducto a la entrada.

Los resultados demuestran que si bien no existe un único factor determinante, existen factores de mayor importancia para determinar la profundidad máxima del foso de erosión que se produce y la superficie de la cubeta de erosión, como son la presencia o no de aletas y número de Froude densimétrico.

Aplicación de técnicas cfd para el análisis de desagües profundos en grandes presas

A. Bayón, J. F. Macián-Pérez, F. J. Vallés-Morán

Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. Camí de Vera, s/n, 46022 Valencia. arbabar@iiama.upv.es.

Los órganos de desagüe de las presas constituyen una parte crítica de éstas, principalmente a causa de las catastróficas consecuencias que pueden derivarse de su potencial fallo. Precisamente por ello, el diseño y la monitorización del correcto funcionamiento de los órganos de desagüe adquieren una importancia clave en materia de seguridad de presas. El análisis de su funcionamiento constituye un fenómeno de elevada complejidad ya que, a la complicada geometría de los mismos, se une un flujo muy turbulento, a menudo, con contenido no despreciable de aire. El problema principal surge a la hora de caracterizar y cuantificar las solicitaciones a las que pueden llegar a ser sometidos los dispositivos que regulan la operación del desagüe en situaciones extremas, en particular, si se tiene en cuenta la impredecibilidad del flujo que se desarrolla en su interior, lo que imposibilita un enfoque estrictamente analítico para su estudio.

En ese sentido, el modelado numérico tridimensional está llamado a aportar soluciones cuyo análisis desde el punto de vista experimental supondría costes muy elevados. Se presenta así un modelo numérico aplicado a un caso de estudio formado por una conducción de 3m de diámetro capaz de trasegar hasta 80m³/s. Dicho vertido se regula mediante una compuerta vertical en la embocadura del desagüe, seguida de una válvula de mariposa. Ambos dispositivos cuentan con sus respectivos conductos de aireación inmediatamente aguas abajo para facilitar la entrada de aire o la salida de agua, cuando las condiciones de operación lo requieran.

El modelo numérico tridimensional empleado se basa en el uso de técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD), en concreto, del código OpenFOAM (OpenFOAM, 2017), apoyándose en el método del volumen del fluido (VOF) y en el modelo de turbulencia RANS RNG k- ϵ , cuya aplicación en casos semejantes ha dado resultados satisfactorios en el pasado (Bayón et al., 2016).

La discretización del dominio a analizar se realiza a partir de una malla estructurada de elementos cúbicos, a la que se aplica un refinado selectivo en las zonas donde se espera que ocurran mayores gradientes.

Las características del modelo permiten analizar una extensa casuística de escenarios de operación diferentes, fruto de toda la combinatoria posible de niveles de embalse aguas arriba y aguas abajo de la presa y de grados de apertura de compuerta y válvula, para su posterior representación y análisis.

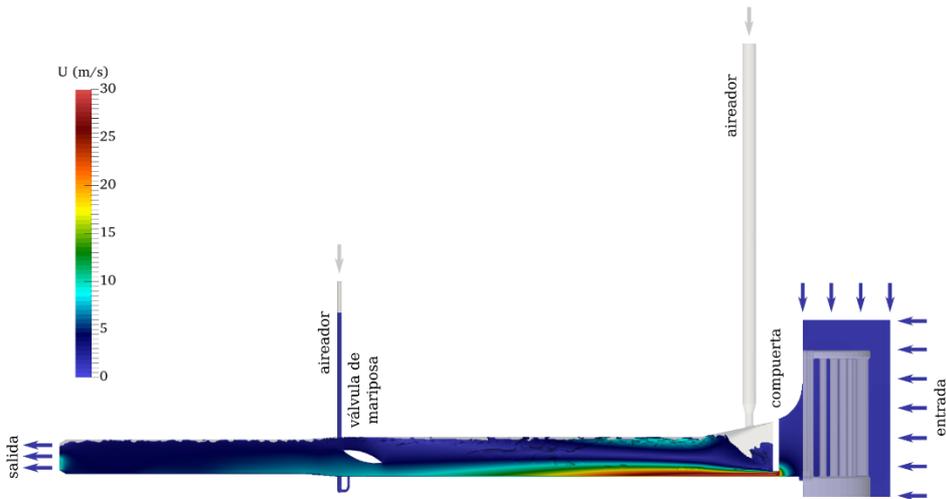


Figura 1. Ejemplo de caso simulado: campo de velocidades en corte longitudinal.

De los resultados obtenidos, se obtiene el caudal circulante en función de las reglas de operación del desagüe, así como la demanda de aire, las presiones mínimas en cada escenario analizado (a fin de detectar la ocurrencia de cavitación) y las fuerzas y momentos actuantes sobre la válvula y la compuerta. Esto permite detectar las situaciones de operación a evitar para un correcto funcionamiento del conjunto de la estructura.

Referencias

Bayon, A., Valero, D., García-Bartual, R., Vallés-Morán, F.J. y López-Jiménez, P.A. 2016. Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environmental Modelling & Software* 80, 322-335.

OpenFOAM. 2017. OpenFOAM: the Open Source CFD Toolbox User Guide. The Free Software Foundation Inc.

Diseño de la campaña experimental y análisis previo de resaltos hidráulicos estacionarios de alto número de Reynolds

J. F. Macián-Pérez¹, A. Bayón¹, F. J. Vallés-Morán¹, R. García-Bartual¹, P. A. López-Jiménez²

¹ Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. Camí de Vera, s/n, 46022 Valencia. juamapre@cam.upv.es.

² Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. Camí de Vera, s/n, 46022 Valencia.

El resalto hidráulico constituye un fenómeno de elevada complejidad y con importantes aplicaciones en ingeniería hidráulica en general y en disipación de energía en grandes presas en particular. La gran complejidad del resalto viene dada por las fluctuaciones turbulentas, la intensa entrada de aire y la importante disipación de energía que tienen lugar en el mismo.

La impredecible naturaleza del resalto hidráulico hace que, tanto la modelación física como la matemática constituyan una parte fundamental de su estudio. En este sentido, el presente estudio propone la caracterización experimental de un resalto hidráulico con el objetivo de estudiar su estructura y características, así como la interacción entre los distintos procesos que tienen lugar en el desarrollo del mismo.

El primer paso consiste en seleccionar el resalto hidráulico a caracterizar. Para ello, cabe destacar que los resaltos hidráulicos se clasifican en general haciendo uso del número de Froude de aproximación (Fr_1). En función de este, los resaltos hidráulicos pueden ser ondulares, débiles, oscilantes, estacionarios o fuertes. De acuerdo con el USBR (Peterka, 1978), los resaltos hidráulicos que ofrecen un mejor comportamiento para la disipación de energía en cuencos amortiguadores de presas son los estacionarios ($4,5 < Fr_1 < 9$) por lo que se opta por un resalto hidráulico con $Fr_1 \sim 6$. Otro número adimensional clave en la modelación de flujos a escala reducida es el de Reynolds, que establece una relación entre fuerzas inerciales y viscosas. La importancia de este número radica en que ha de alcanzar valores altos ($Re_1 > 100000$) para mitigar la aparición de efectos de escala en el modelo físico (Heller, 2011) y por tanto, permitir extrapolar los resultados obtenidos en laboratorio a escala de prototipo. Así pues, el resalto

hidráulico objeto de este estudio presenta un $Re_1 \sim 210000$. Una vez definido el resalto hidráulico, éste se materializa en el canal de ensayos disponible en el Laboratorio de Hidráulica y Obras Hidráulicas de la Universitat Politècnica de València.

La campaña de ensayos diseñada para la caracterización del resalto hidráulico busca ser lo más completa posible, extendiéndose tanto al flujo supercrítico y subcrítico, como al propio cuerpo del resalto. Así pues, las mediciones planteadas pueden observarse en la Figura 1 adaptada de Bayón *et al.* (2016).

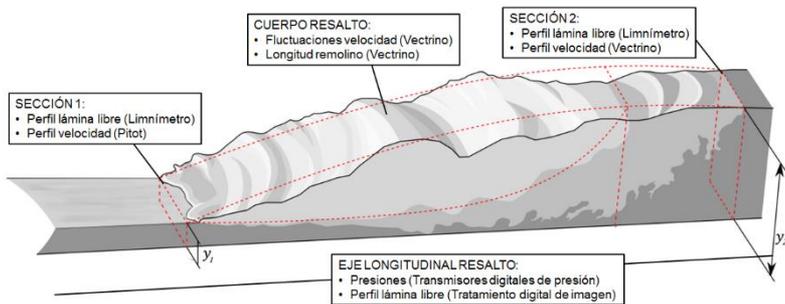


Figura 1. Caracterización experimental del resalto hidráulico.

Paralelamente, se buscará dar un contraste numérico a los resultados obtenidos en la campaña experimental, por lo que se emplearán sendos códigos de dinámica de fluidos computacional (En este caso FLOW-3D y OpenFOAM) para realizar un modelo matemático basado en el método de los volúmenes finitos (FVM) y el *volume of fluid* (VOF), con cierre de turbulencia tipo RANS, que represente la situación ensayada en laboratorio.

Así pues, estos trabajos de diseño de campaña experimental y construcción de modelo matemático suponen los primeros pasos de un análisis que pretende comparar los resultados obtenidos a través de la modelación física y matemática de un resalto hidráulico de alto número de Reynolds y número de Froude similar al de los resaltos que se emplean en los cuencos amortiguadores para la disipación de energía en presas.

Referencias

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

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

Peterka, A. J. *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. No. 25. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1978.

Bloque prefabricado en forma de cuña (WSB) con sistema de drenaje y aireación superior para protección frente a la erosión por corrientes de agua

F. J. Caballero¹, R. Morán¹, C. Ponce-Farfán¹, R. Oliva¹, M. A. Toledo¹, J. San Mauro², F. Salazar², L. Ruano³, M. Monterde³, J. L. García-Ramos⁴

¹ Grupo de Investigación en Seguridad de Presas y Aliviaderos (SERPA), Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

² Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).

³ PREHORQUISA.

⁴ Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

Entre los años 2011 y 2017, la UPM, CIMNE y la empresa PREHORQUISA, con la colaboración del CEDEX, han pretendido complementar los conocimientos teóricos y prácticos de la tecnología de bloques en forma de cuña (WSB por sus siglas en inglés, wedgeshaped blocks) (Fig.1a), para hacer de la misma una opción más, a disposición de los profesionales, a considerar en el diseño de un aliviadero de un dique de tierras.

La comunicación pretende ofrecer un resumen de estos estudios, llevados a cabo bajo el paraguas de los proyectos ACUÑA (IPT- 2011-0997-020000) y DIABLO (RTC-2014-2081-5), financiados por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad del Gobierno de España.

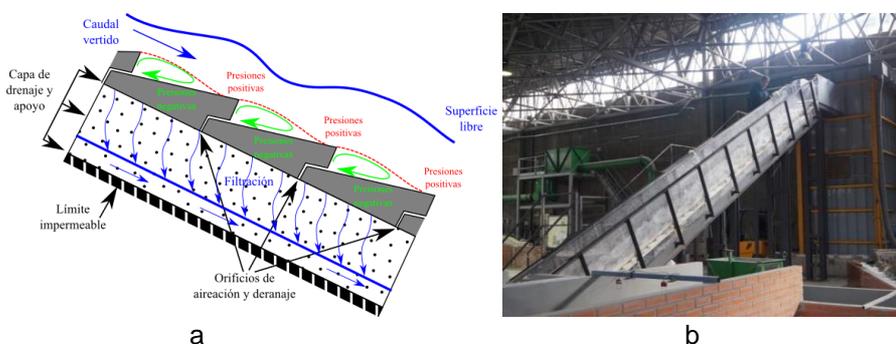


Figura 1. a) Esquema del funcionamiento hidráulico de un aliviadero de bloques en forma de cuña. Fuente: Dam Protections against Overtopping and Accidental Leakage, Ed. Balkema. b) Modelo físico de los proyectos ACUÑA y DIABLO ubicado en el CEDEX.

Las líneas principales de dichos proyectos se han centrado en:

- Caracterizar las presiones en la cara superior del bloque y en la parte frontal de la contrahuella, estableciendo un criterio para determinar cuando existe riesgo de cavitación. En este sentido se han comparado los resultados obtenidos en el modelo físico ubicado en el CEDEX con los existentes hasta el momento y se han medido por primera vez valores en la contrahuella de los escalones. A modo de ejemplo en la figura 2 se muestran los sensores dispuestos en los bloques de medición de presiones y parte de los resultados obtenidos.
- Explicar el patrón de funcionamiento hidráulico de este tipo de aliviaderos, verificando su estabilidad tanto desde el punto de vista de los bloques como de la capa de drenaje bajo los mismos para distintas tipologías de espaldón. Hasta el momento se ha obtenido tanto numérica como físicamente el comportamiento de los bloques y la capa de drenaje en el caso de ubicarse los mismos en el espaldón permeable de una presa de escollera, sin saturación de la mencionada capa de drenaje (figura 3b).

En los próximos meses se prevé obtener resultados sobre presas homogéneas (espaldones no permeables) mediante ensayos físicos que servirán para validar los modelos numéricos ya realizados.

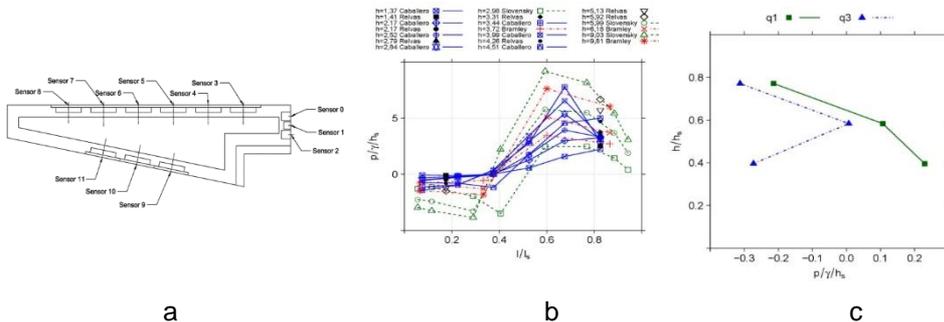


Figura 2. a) Ubicación de los sensores de presión en los bloques de medición de presiones del proyecto ACUÑA. b) Comparación de presiones en huella de bloque obtenidas en modelo físico por diversos autores, incluido proyecto ACUÑA. c) Presiones en contrahuella de bloque obtenidas en modelo físico, proyecto ACUÑA.

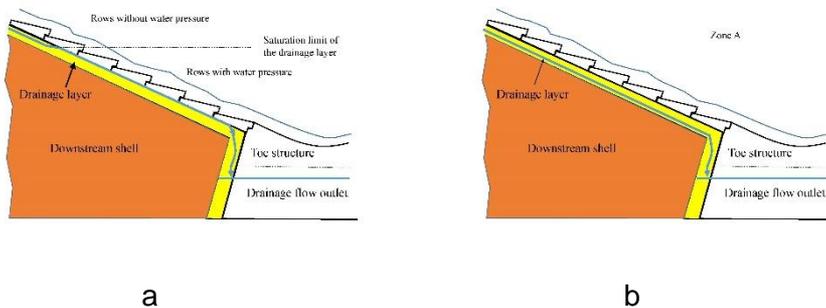


Figura 3. Esquemas de funcionamiento con capa de drenaje bajo los WSB saturada (a) y no saturada (b). Fuente: 2nd International Seminar on Dam Protections against Overtopping.

- Definir un nuevo bloque (WSB), que sea capaz de mejorar el rendimiento de los actuales, habiéndose presentado durante el año 2016 una patente con este producto (ES2595852, figura 4b) que ya ha sido aprobada previo examen y publicada con fecha 8 de mayo de 2017 en el Boletín Oficial de Propiedad Industrial.

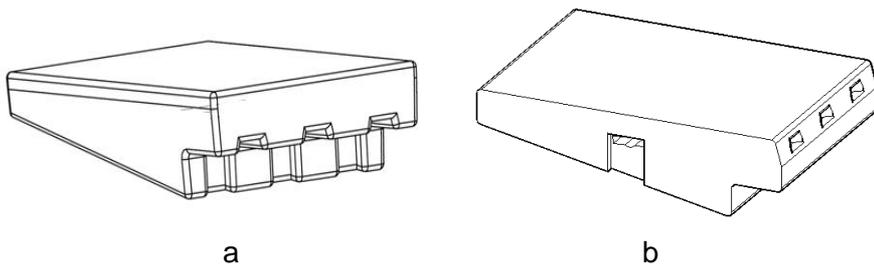


Figura 4.a. Vista 3D de los bloques en forma de cuña (WSB) ensayados: (a) WSB de patente norteamericana; (b) WSB patente española resultante de los proyectos ACUÑA y DIABLO.

- Dar respuesta a la demanda de cálculo y dimensionamiento de aliviaderos con esta solución concreta de protección de una forma integral, mediante una herramienta numérica, de la que ya se dispone de una primera versión.
- Estudiar la variación del tipo de material a emplear en la fabricación de los bloques, evaluando la utilización en dicho proceso de hormigones no convencionales, tales como por ejemplo, hormigones con fibras; estando esta parte de la investigación actualmente en marcha.

Agradecimientos

Los trabajos presentados se han realizado dentro de los proyectos ACUÑA (IPT-2011-0997-020000) y DIABLO (RTC-2014-2081-5), financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad, en el marco del “Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica”. Además, el proyecto ACUÑA ha sido parcialmente financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Comisión Europea.



Referencias bibliográficas

Colorado State University (CSU, 2017). Ponencias del 2nd International Seminar on Dam Protections against Overtopping and Accidental Leakage. Protections 2016. <https://dspace.library.colostate.edu/handle/10217/179778>

Hewlett, H., Baker, R., May, R., & Pravdivets, Y. P. (1997). Design of stepped-block spillways. London, U.K.: Construction Industry Research and Information Association.

Pravdivets, Y. P. & Slisky, S. M. (1981). Passing flood waters over embankment dams. *International Water Power and Dam Construction*, 33(7), 30-32.

Relvas, A.T. (2008). Descarregadores de Cheias de Blocos de Betão Prefabricados em Forma de Cunha sobre Barragens de Aterro. Ph.D. Thesis, Universidade Tecnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Slovensky Jr, G.G. (1993). Near-prototype testing of wedge-block overtopping protection. Ph.D. Thesis, Colorado State University, United States.

Toledo, M. A.; Morán, R. and Oñate, E. (2015). Dam Protections against Overtopping and Accidental Leakage. CRC Press/ Balkema, ISBN 978-1-138-02808-1.

US Federal Emergency Management Agency, FEMA. (2014). Technical manual: Overtopping protection for dams U.S. Department of Homeland Security.

Análisis numérico tridimensional del flujo generado por la rotura de una presa

E. Sánchez-Cordero¹, J. Boix², M. Gómez³, E. Bladé⁴

¹ *Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador*

Institut FLUMEN Universitat Politècnica de Catalunya, España (escsanchezcordero@gmail.com).

² *Institut FLUMEN Universitat Politècnica de Catalunya, España (jboliva95@hotmail.com).*

³ *Institut FLUMEN Universitat Politècnica de Catalunya, España (manuel.gomez@upc.edu).*

⁴ *Institut FLUMEN Universitat Politècnica de Catalunya, España (ernest.blade@upc.edu).*

Palabras claves: *rotura de presa, 3D, LES, OpenFOAM.*

Introducción

Una presa es una obra que se lleva a cabo para contener o regular el curso del agua en un cauce fluvial. La onda generada por la falla o rotura repentina de una presa puede ocasionar un importante impacto sobre la población, incluyendo la pérdida de vidas humanas, y un severo impacto al medio ambiente. De esta manera, en los últimos años se han realizado importantes esfuerzos para obtener soluciones numéricas satisfactorias para este problema. Debido al avance tanto en poder computacional como en la capacidad de memoria disponible de los computadores, los modelos numéricos 3D basados en las ecuaciones de Navier Stokes se han convertido en una alternativa de análisis en este tiempo.

Diversas simulaciones numéricas basadas en ecuaciones 2D fueron validadas con resultados experimentales de laboratorio como se muestra en [1] y [2]. Los modelos numéricos bidimensionales suponen velocidades y aceleraciones verticales despreciables lo que da lugar a una distribución hidrostática de presiones. Sin embargo, cuando se produce una rotura abrupta de una presa, toda el agua almacenada en el embalse es liberada bruscamente y el flujo es influenciado principalmente por la aceleración vertical debida a la gravedad, haciendo que la hipótesis de la distribución de presión hidrostática no sea válida.

El presente trabajo muestra un análisis numérico 3D de una rotura de presa a escala de laboratorio mediante el uso del código basado en el método de volúmenes finitos (FVM) - OpenFOAM. En el modelo numérico la turbulencia es tratada con la metodología LES (Large Eddy Simulation) y el método VOF (Volume of Fluid) es usado para la captura de la superficie libre del agua. Los resultados numéricos obtenidos se comparan con los datos experimentales de

laboratorio presentados por Kleefsman [3]. Para validar el modelo numérico se utilizan las variables de calado y presión. Los resultados muestran que el código numérico 3D es capaz de reproducir satisfactoriamente la variación temporal de las variables en estudio.

Modelo experimental

En la figura 1 se muestra el esquema del experimento de laboratorio realizado por Kleefsman [4]. Las dimensiones del tanque de ensayo fueron de 3.22x1x1 m. La parte derecha del tanque de ensayo fue llenada con agua hasta una altura de 0.55m. En el experimento se utilizaron 4 sensores para la medición de calado y 8 sensores para la medición de los valores de presión.

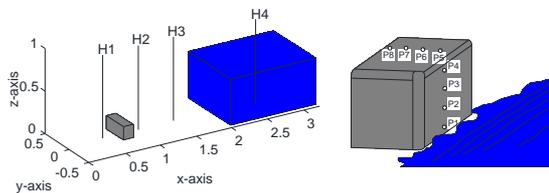


Figura 1. Esquema del modelo experimental – posiciones de las medidas de calado y presión (“Adaptado de Kleefsman [3]”).

Breve descripción del modelo numérico

Modelo de Flujo

En este apartado se presenta la ecuación de conservación de masa y la ecuación de conservación de momento:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) - \nabla \cdot ((\mu + \mu_t)S) = -\nabla p + \rho g + \sigma K \frac{\nu u}{|\nabla \alpha|} \quad (2)$$

En donde, ρ es la densidad, u es la velocidad, p es la presión, μ_t es el coeficiente de viscosidad de torbellino (Eddy viscosity), μ es la viscosidad dinámica, S es el tensor de deformaciones ($S = 1/2 (\nabla u + \nabla u^t)$), σ es la tensión superficial, K es la curvatura superficial, y α es la fracción de volumen (valor entre 0-1).

Modelo de Turbulencia

En este estudio se usa el modelo de Simulación de grandes torbellinos LES por sus siglas en inglés (Large Eddy Simulation). El modelo LES se basa en un filtrado espacial de las ecuaciones de gobierno del fluido, cuya idea es resolver las grandes escalas de turbulencia y aproximar el efecto de las escalas pequeñas. Para el análisis de este caso se utiliza el Submodelo de Smagorinsky, el cual emplea un filtrado espacial rectangular, modelando los pequeños remolinos con expresiones que permiten el cálculo aproximado de los coeficientes de viscosidad, conductividad térmica y de disipación.

Configuración numérica

El dominio se discretiza utilizando elementos cartesianos cúbicos. Se empleó una malla fina de 322 x 100 x 60 elementos con una cierta densificación hacia las paredes del experimento. Se simuló 7s continuos con un paso de tiempo adaptado automáticamente a un número de Courant máximo de 0.50.

Resultados y discusión

La Figura 2 muestra la evolución en el tiempo del calado en el punto H1 y de los valores de presión en el punto P2. El valor estadístico R^2 (valor cuadrático medio) se utiliza para cuantificar el ajuste de las variables en mención. Se obtienen valores de R^2 de 0.879 para la variable de calado y de 0.865 para la presión. Una evaluación cualitativa de los resultados muestra que el modelo numérico 3D es capaz de seguir la variabilidad en el tiempo de ambas variables en estudio. Desde luego, existen partes en las cuales el modelo subestima los valores mientras que otras los sobrestiman.

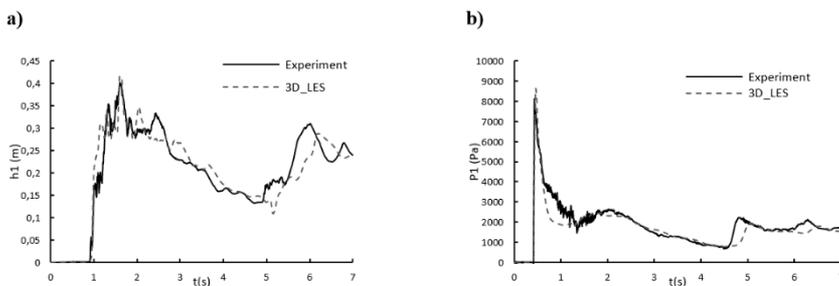


Figura 2. Valores de calado en función del tiempo (punto H1), b) Valores de presión en función del tiempo (punto P1).

Conclusiones

Este estudio investiga la aplicabilidad del código numérico 3D OpenFOAM para el estudio de variables de flujo en una simulación de rotura de presa a escala de laboratorio. El análisis de resultados demuestra que la predicción de valores de calado y presión en el tiempo llevada a cabo por la configuración del modelo numérico es bastante precisa. Aunque el ajuste entre la solución numérica y los datos del experimento físico es bastante prometedora, la aplicación del modelo numérico 3D para la simulación a una escala real sería computacionalmente demandante en tiempo y recursos.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al apoyo financiero otorgado por la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Gobierno de la República del Ecuador a través de la beca doctoral del primer autor.

Referencias

- [1] L. Fraccarollo and E. F. Toro, "Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems," *J. Hydraul. Res.*, vol. 33, no. 6, pp. 843–864, Nov. 1995.
- [2] S. Soares-Frazão and Y. Zech, "Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle," *J. Hydraul. Res.*, vol. 45, no. sup1, pp. 27–36, Dec. 2007.
- [3] K. M. T. Kleefsman, G. Fekken, A. E. P. Veldman, B. Iwanowski, and B. Buchner, "A Volume-of-Fluid based simulation method for wave impact problems," *J. Comput. Phys.*, vol. 206, no. 1, pp. 363–393, Jun. 2005.

