

---

# REVISTA HIDROLATINOAMERICANA DE JÓVENES INVESTIGADORES Y PROFESIONALES

---

Volumen 3 – 2019  
ISSN: 2520-2960



International Association  
for Hydro-Environment  
Engineering and Research

Supported by  
Spain Water and IWHR, China



Young  
Professionals  
Network

Supported by  
Spain Water and IWHR, China

REVISTA  
HIDROLATINOAMERICANA  
DE  
JÓVENES  
INVESTIGADORES Y  
PROFESIONALES

Volumen 3 – 2019  
ISSN: 2520-2960



**Revista Hidrolatinoamericana  
de Jóvenes Investigadores y  
Profesionales**

**ISSN: 2520-2960 (digital)**

**Julio de 2019**

**Director y Editor**  
**José M. Carrillo**

**Editores Asociados**  
**Edwin Y. Saavedra Cifuentes**  
**Patricia R. Ortega Lara**  
**Yoch Ponte Torres**  
**Francisca Marco Cutillas**

**Edita**  
**International Association for  
Hydro-Environment  
Engineering and Research**

[iahr@iahr.org](mailto:iahr@iahr.org)  
[www.iahr.org](http://www.iahr.org)

**Madrid Office:**  
Paseo Bajo Virgen del Puerto 3,  
28005 Madrid, SPAIN  
Tel. +34 91 335 7908

**Beijing Office:**  
A-1 Fuxing Road, Haidian  
District, 100038 Beijing, CHINA  
Tel. +86 10 6878 1808

# Sumario

- i Sobre la División Regional Latinoamericana (LAD-IAHR)
- ii Sobre la revista
- iii Comité Editorial

- 1 Diseño de jetbox para transición de flujo a presión a lámina libre con técnicas CFD / Design of jetbox for transition from pressurized flow to free surface using CFD modeling  
(*Bayón, A.; Vallés-Morán, F. J.*)
- 5 Construcción e implementación de sondas de conductividad para la medición de flujos bifásicos agua-aire / Construction and implementation of conductivity probes for the measurement of two-phase water-air flows  
(*Ortega P.R.; Marco F.; Castillo L.G.*)
- 9 Modelación de nutrientes y evaluación de uso de suelo usando la herramienta de agua y suelo (SWAT), Caso de estudio: Cuenca del Río Coca / Nutrient modelling and land use assessment using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), Case study: Coca River Basin  
(*Narváez M., López C., Reinoso I., Minaya V.*)
- 13 Evaluación de un separador de caudales para alcantarillado combinado aplicando la metodología CFD / Evaluation of flow separator for combined sewer system applying CFD methodology  
(*Santamaría J.; Hidalgo X.; Ortega P.; Casa E.; Vera P.; Galarza J.*)
- 17 Usando R para una fácil y eficiente predicción de la incertidumbre de simulaciones de modelos ambientales / Using R to easily and efficiently predict the uncertainty in simulations of environmental models  
(*Duque-Gardeazábal N.; Fuentes C.*)
- 21 Caracterización del tamaño de burbuja en flujos altamente aireados / Characterization of the bubble size in highly aerated flows  
(*Marco F.; García J.T., Castillo L.G.*)

**Supported by Spain Water and  
IWHR, China**

## Sobre la División Regional Latinoamericana (LAD-IAHR)

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

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

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

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

En la actualidad, la División Regional Latinoamericana (LAD-IAHR) cuenta con 22 grupos de Redes de Jóvenes Profesionales (YPN), con presencia en 7 países.



## Sobre la revista

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

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

Sus objetivos son:

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

Pensamos que esta revista de publicación anual es una gran oportunidad para que los Jóvenes Investigadores y Profesionales puedan difundir sus actividades, aportando a la comunidad Latinoamericana de Hidráulica una panorámica de la investigación y los trabajos singulares que se realizan en sus distintos centros.

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

Las instrucciones de estilo y formato pueden descargarse de la plantilla de Microsoft Word en el enlace situado en la página web propia de la revista (<https://www.iahr.org/site/cms/contentCategoryView.asp?category=388>). Asimismo, la página web de la revista facilita el acceso a todos sus contenidos.

Todas las contribuciones se someten a un proceso de revisión anónima por pares externos a la institución editora. La revisión por indicará si el artículo puede ser válido para su publicación.

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



## Comité Editorial

**Editor:** D. José M. Carrillo

### Editores asociados (por grupos YPN)

**IAHR Bogota Young Professionals Network**  
D. Edwin Y. Saavedra Cifuentes

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

**IAHR Escuela Politécnica Nacional Young Professionals Network**  
D. Patricio R. Ortega Lara

**IAHR South East Spain Young Professionals Network**  
Dña. Francisca Marco Cutillas

## Comité Científico Externo

D. Arnau Bayón  
*Universitat Politècnica de València (España)*

D. Lenin Campozano Parra  
*Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)*

D. Christian Frias  
*University of Pittsburgh (Estados Unidos)*

D. Luis G. Castillo  
*Universidad Politécnica de Cartagena (España)*

D. Daniel Valero  
*IHE Delft Institute for water Education (Holanda)*

D. Nicolás Escobar Castañeda  
*Pontificia Universidad Javeriana (Colombia)*

D. Edwin Casa Tipán  
*Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)*

D. Pablo Vera  
*Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)*

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

D. Rafael Leonardo Sandoval Pabón  
*Universidad Nacional de Colombia (Colombia)*

D. Juan T. García  
*Universidad Politécnica de Cartagena (España)*

D. Xavier Zapata  
*Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)*

D. Kensuke Naito  
*University of Illinois at Urbana-Champaign (Estados Unidos)*

Revista Hidrolatinoamericana publica bajo la licencia



Revista Hidrolatinoamericana, ISSN: 2520-2960.

© 2019 International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR).

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>). iii

# Diseño de jetbox para transición de flujo a presión a lámina libre con técnicas CFD

## *Design of jetbox for transition from pressurized flow to free surface using CFD modeling*

(Recepción 05/03/2019; Aceptación 25/05/2019)

Bayón, A.; Vallés-Morán, F. J.

<sup>1</sup>Instituto de Ing. del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València (España).

Teléfono: (+34) 96 3877613

Email: arbabar@iiama.upv.es

**Resumen.** El análisis hidráulico de los cuencos de amortiguación de presas requiere el empleo de modelos experimentales. Dado que no siempre es posible construir un aliviadero a escala respetando las leyes de semejanza, es habitual alimentar el dispositivo mediante una instalación a presión gracias a un jetbox o tobera que haga pasar el flujo a presión a lámina libre. Poca atención se presta al diseño de este dispositivo crucial, por lo que el presente trabajo plantea su diseño mediante un modelo CFD tridimensional con modelo RANS RNG k- $\epsilon$  para el tratamiento de la turbulencia. Los valores mínimos de determinadas dimensiones, como las longitudes de cada tramo o los coeficientes de expansión o contracción, para no introducir excesivo sesgo en el futuro modelo experimental son calculados y las repercusiones de estos parámetros en los resultados representados y analizados.

**Palabras clave.** CFD; RNG k- $\epsilon$ ; jetbox; hidráulica.

**Abstract.** The hydraulic analysis of dam stilling basins requires employing experimental models. Given that building a scaled spillway respecting similarity laws is not always possible, it is common practice to supply the device using a pressurized facility thanks to a jetbox or nozzle that makes the pressurized flow become free surface. Little attention is paid to this crucial device design, so this work proposes its design using a three-dimensional CFD model with RANS RNG k- $\epsilon$  for turbulence modeling. The minimum values of certain dimensions, such as stretch lengths or expansion/contraction coefficients, to avoid introducing excessive bias in the future experimental model are computed and the consequences of these parameters on results are reported and discussed.

**Keywords.** CFD; RNG k- $\epsilon$ ; jetbox; hydraulics.

## 1.Introducción

El estudio del funcionamiento de las presas despierta gran interés a día de hoy dadas las terribles consecuencias de su eventual fallo, como ocurrió en la Presa de Burmadiño (Brasil) en 2019 o en la Presa de Xe-Pian Xe-Namnoy (Laos) en 2018. A causa de la naturaleza altamente turbulenta y aireada del flujo en sus aliviaderos, especialmente, en condiciones de avenida, es habitual recurrir al modelado físico reducido para su análisis en laboratorio. No obstante, construir modelos que reproduzcan aliviaderos de grandes presas respetando el rango de escalas que imponen las leyes de semejanza no siempre es posible debido a su gran tamaño y, por ende, elevado coste. Por esa razón, si lo que se pretende es estudiar el flujo en el cuenco de disipación, se suele recurrir a la sustitución de parte del aliviadero por una instalación a presión donde una tobera aporta el caudal de descarga en las condiciones de calado y velocidad propias del aliviadero funcionando por gravedad.

A parte de que la instalación tenga la potencia necesaria para suministrar el caudal y la presión necesarios, del diseño geométrico de dicha tobera, a

menudo referida como “jetbox”, dependerá la fiabilidad de la instalación. Por ejemplo, cambios de sección demasiado abruptos pueden causar despegues y recirculaciones internas que hagan que, ya en lámina libre, el flujo no tenga las propiedades esperables a pie de presa, redundando en un notable sesgo de los resultados experimentales. Si los cambios de sección se realizan de forma gradual, se evitará dicho problema, pero no es conveniente ni realista diseñar un jetbox demasiado grande por cuestiones de practicidad y coste.

A pesar de la importancia de este aspecto, se le suele prestar poca atención, pues no existen directrices orientativas y las pocas alusiones que se hacen al diseño del jetbox dan a entender que son hechas a estima (Gargano y Hager, 2002; Boes y Hager, 2003).

Dado que realizar una instalación experimental para diseñar el jetbox que, en última instancia, formará parte de una instalación experimental puede parecer excesivamente tedioso y bastante costoso, el presente trabajo propone el diseño del jetbox empleando un modelo numérico de dinámica de fluidos computacional (CFD) tridimensional implementado en la plataforma de código abierto OpenFOAM.



Dicho modelo, aparentemente inexistente en la literatura, técnica permite: a) analizar la sensibilidad a una serie de parámetros geométricos de la instalación bajo estudio b) decidir qué dimensiones constituyen un buen compromiso entre tamaño (y coste) de la instalación y precisión de los resultados que esta aportará y c) cuantificar el sesgo que el empleo de una instalación a presión para emular el papel de un aliviadero de presa supone.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Caso de estudio

El caso de estudio es la instalación que alimenta un canal para el estudio del efecto de la aireación en resaltos hidráulicos en cuencos amortiguadores. Las dimensiones de la sección de entrada corresponden a un ancho de  $L_y=0.80\text{m}$  y un calado máximo de  $d=0.10\text{m}$  con un caudal de  $0.140\text{m}^3/\text{s}$  ( $q=0.175\text{m}^2/\text{s}$ ). Dicha entrada al canal se produce a  $\beta=53.13^\circ$ , correspondiente a un aliviadero de talud 0.75:1. La instalación a presión consta de un tramo ascendente de tubería circular de diámetro  $\phi=0.2776\text{m}$  (tubería de PVC de presión DN315), un codo de  $90^\circ$ , un tramo horizontal, una transición de sección circular a cuadrada de lado igual al diámetro, un giro descendiente hasta la inclinación que impone el talud del aliviadero y, por último, un tramo de expansión horizontal y contracción vertical hasta alcanzar el ancho y calado de este (ver Fig. 1).

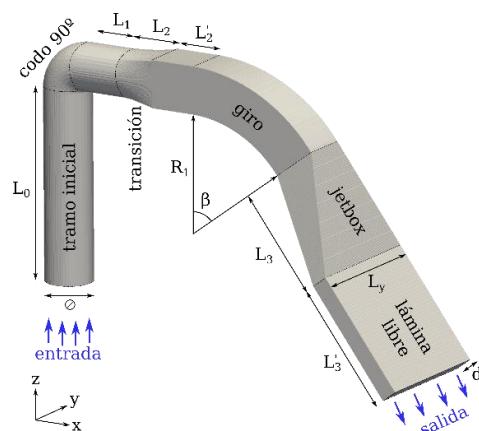


Figura 1. Geometría de la instalación.

El presente trabajo consiste en dimensionar dicha instalación de modo que las condiciones de salida, en lo posible, sean lo más aproximadas a las propias de un aliviadero de pared lisa, especialmente, en términos de calado, perfiles de velocidad y presión. Algunas variables, como el diámetro de la conducción, el ancho del aliviadero o el caudal y calado de este vienen impuestas, mientras que otras, se determinan mediante el modelo CFD descrito a continuación estableciendo un compromiso entre longitud mínima de cada dimensión y la mejora marginal que supone incrementarla. Las variables a estudiar son:

- Longitud del tramo horizontal:  $L_1$

- Longitud de la transición  $L_2$
- Radio de giro:  $R_1$
- Longitud del jetbox:  $L_3$

### 2.2. Modelo numérico

El modelo numérico planteado contempla una malla estructurada de elementos cúbicos, donde el análisis de convergencia de malla y los valores de  $y^+$  indican que no existe la necesidad de aplicar un refinado selectivo. Se lleva a cabo el pertinente análisis de convergencia de malla según Celik et al. (2008) con 5 mallas de tamaño de elemento de 3, 4, 7, 9 y 10mm, lo que da pie a decantarse por el tamaño  $\Delta x=3\text{mm}$  (orden aparente de malla  $p=1.91$  y índice de convergencia de malla  $GCI=7.95\%$ ). El presente modelo se implementa en la plataforma CFD de libre acceso OpenFOAM, por lo que la generación de la malla se lleva cabo con *blockMesh* y *snappyHexMesh*.

Pese a tratarse de un dispositivo experimental para estudio de flujos aireados, la zona a presión de la instalación funciona con un solo fluido, por lo que se recurre al algoritmo SIMPLE, que aplica el promediado de Reynolds de las Ecuaciones de Navier-Stokes (RANS) con un modelo de turbulencia RNG k-ε, que, en la experiencia de los autores, aporta buenos resultados en modelos similares (Bayón y López-Jiménez, 2015; Bayón et al., 2016, 2017).

Respecto a las condiciones de contorno del problema, se impone el caudal deseado ( $0.140\text{m}^3/\text{s}$ ) en la entrada, con una condición de contorno de salida libre (presión atmosférica) a la salida. A los contornos sólidos, se les impone una condición de no deslizamiento de pared lisa, salvo a la correspondiente a la lámina libre en el tramo final del modelo, a la que se le impone una condición de deslizamiento. Este enfoque permite obviar el papel del aire y evita tener que recurrir a un modelo bifásico con VOF o similar, con el consiguiente ahorro de coste computacional. Con finalidad similar, a los contornos sólidos, se les impone una función de pared de alto número de Reynolds para evitar el excesivo refinado de la malla.

Las cuatro variables geométricas anteriores se estiman simulando, primero, el tramo horizontal con la salida al final de este. Después, una vez adoptado el valor  $L_1$  definitivo, se simula el primer y segundo tramo para determinar  $L_2$  y, así, sucesivamente hasta simular el modelo completo.

## 3. Análisis de resultados

La Fig. 2 muestra los resultados obtenidos a partir del modelo numérico con las dimensiones de instalación supuestas a priori. Puede observarse una aceleración en la zona superior de la conducción horizontal propia del giro abrupto que impone el codo de  $90^\circ$ , con la consiguiente región de gradiente de presión negativo y el correspondiente despegue de flujo y recirculación. En las zonas superiores de ambos giros, el codo a  $90^\circ$  y el más gradual, se aprecian

ligeras sobrepresiones propias del estancamiento parcial que imponen y que deben ser tenidas en cuenta para el correcto anclaje de la instalación experimental.

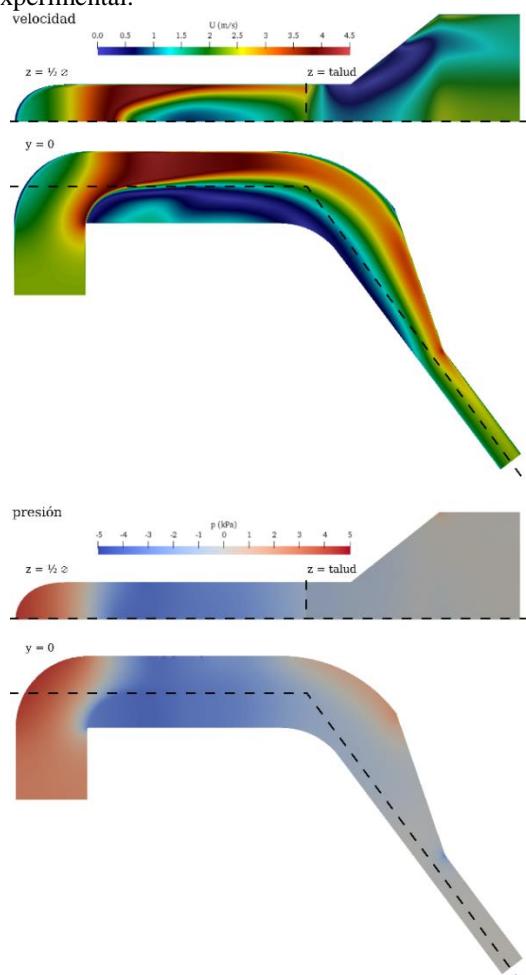


Figura 2. Secciones de planta y perfil de los campos de velocidad y presión de la instalación.

La Fig. 3 muestra las líneas de corriente en planta y alzado en el mismo escenario, donde, no solo se observa claramente la recirculación aguas abajo del codo a 90°, sino un despegue indeseable en la zona de expansión horizontal de la conducción. Este fenómeno debe limitarse, pues compromete de forma determinante la consecución del objetivo de la instalación, que es la entrega del flujo en condiciones.

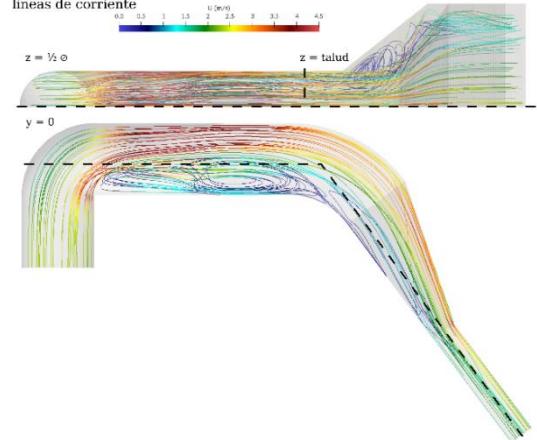


Figura 3. Líneas de corriente en planta y perfil de la instalación.

Gracias a una serie de simulaciones preliminares, se determina la longitud mínima de tramo inicial vertical necesaria para alcanzar el completo desarrollo del flujo, hallándose que, a partir de  $L_0=\emptyset$ , la variación del perfil es inferior al 1%, valor aceptable y con una repercusión escasa en el desarrollo posterior del flujo y con un coste computacional que, en caso de aumentar la longitud inicial, haría el modelo inviable por cuestiones económicas y de espacio físico.

### 3.1. Longitud de tramo horizontal $L_1$

El tramo horizontal es, con toda certeza, en el que ocurre la mayor perturbación del flujo, ya que se da una inevitable separación y recirculación de este aguas abajo del codo, como se observa en las Fig. 2 y 3. Por ello, como se puede ver en la Fig. 4, tras el codo, la estabilización total del flujo ocurriría con valores de  $L_1$  fuera de lo razonable y factible, razón por la cual, se opta por un valor de  $L_1=1.70\text{m}$ , que supone una variación marginal del perfil de velocidad y presión del 5%.

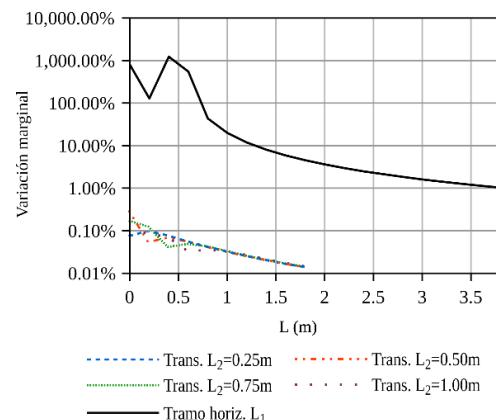


Figura 4. Variación marginal media de la velocidad en el tramo horizontal ( $L_1$ ) y tras la transición de circular a cuadrada ( $L_2$ ).

### 3.2. Longitud de transición $L_2$

Respecto a la longitud de la transición de sección circular a cuadrada, se ensayan los valores 0.25, 0.50, 0.75 y 1.00m y se comparan los perfiles de velocidad a partir del inicio de la transición en los cuatro casos. Como se observa en la Fig. 4, algo a priori contra la intuición, la longitud de transición es prácticamente irrelevante a partir de 1.00m. Por tanto, a menos que ello suponga problemas de manufactura, se adopta el valor de mínimo:  $L_2=0.25\text{m}$ , seguido de  $L_2'=0.75\text{m}$  de sección rectangular.

### 3.2. Radio de giro $R_1$

El radio de giro de la conducción cuadrada es de gran importancia ya que, por un lado, un valor demasiado bajo causa el despegue del flujo ya cerca de la salida aliviadero, mientras que un valor relativamente alto hace crecer la instalación de forma desproporcionada. El modus operandi para optimizar  $R_1$  difiere ligeramente del resto de variables: tras realizar una

primera simulación con un  $R_1$  tentativo, se observa el radio de giro que toman las líneas de corriente del flujo y se adopta este como valor mínimo. A partir de dicho valor ( $R_1=0.35\text{m}$ ), que se observa que no causa despegue de flujo, se prueban valores superiores, comprobándose que los perfiles de velocidad aguas abajo del giro son indiferenciables a partir del tamaño  $R_1=0.70\text{m}$  (ver Fig. 5), que se adopta como óptimo.

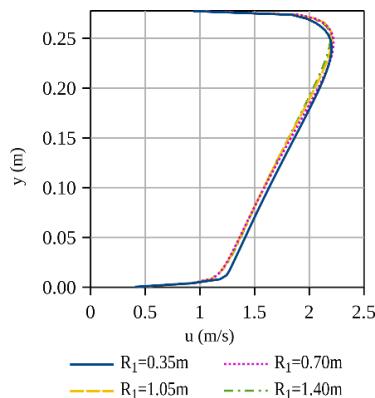


Figura 5. Perfiles de velocidad verticales aguas abajo del giro con diferentes radios de giro ( $R_1$ ).

### 3.2. Longitud del jetbox $L_3$

Por último, a fin de determinar el valor óptimo de la longitud del jetbox propiamente dicho, consistente en una expansión horizontal y una contracción vertical hasta el calado pertinente, se representa el perfil de velocidades horizontal a lo ancho de la salida de la instalación, es decir, de ingreso al canal experimental. El objetivo es conseguir un perfil de velocidades lo más uniforme posible y, como se observa en la Fig. 6, ni yendo a longitudes que prácticamente imposibilitarían la manufactura de la pieza, se logra dicho objetivo al 100%. Es por ello que se adopta como valor de compromiso la longitud correspondiente a  $L_3=0.694\text{m}$ , pues muestra una clara mejora respecto al valor anterior y una diferencia relativamente pequeña respecto al tamaño siguiente, que es el doble.

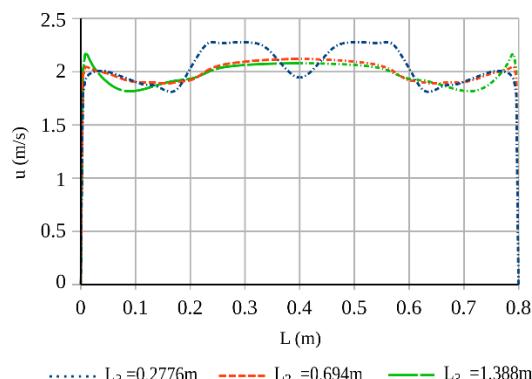


Figura 6. Perfiles de velocidad horizontales aguas abajo del jetbox con diferentes longitudes de este ( $L_3$ ).

A fin de garantizar una distribución más uniforme de velocidades, se contempla la instalación de difusores que ayuden a dirigir el flujo en este tramo de la instalación.

## 4. Conclusiones

Se plantea un modelo CFD tridimensional implementado en la plataforma de código abierto OpenFOAM para el diseño de un jetbox de instalación hidráulica experimental. La mayoría de parámetros geométricos e hidráulicos vienen impuestos, mientras que, para otros, se debe calcular la longitud mínima como compromiso entre tamaño/coste de la instalación y perturbación que imponen (ver Tab. 1).

Tabla 1. Resultados de los parámetros geométricos ( $\phi=0.2776\text{m}$ ).

$L_1$	6.1 $\phi$	$L_3$	2.5 $\phi$
$L_2$	0.9 $\phi$	$R_1$	2.5 $\phi$
$L_2'$	2.7 $\phi$		

Queda como trabajo futuro validar los resultados arrojados por el modelo, que solo podrá llevarse a cabo una vez ejecutada la instalación.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el contexto del proyecto “LA AIREACION DEL FLUJO Y SU IMPLEMENTACION EN PROTOTIPO PARA LA MEJORA DE LA DISIPACION DE ENERGIA DE LA LAMINA VERTIENTE POR RESALTO HIDRAULICO EN DISTINTOS TIPOS DE PRESAS” (BIA2017-85412-C2-1R-AR), financiado por la Agencia Estatal de Investigación (España).

## Referencias

- Bayon, A., y Lopez-Jimenez, P. A. (2015). Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM. Journal of Hydroinformatics, 17(4), 662-678.
- Bayón, A., Valero, D., García-Bartual, R., Vallés-Morán, F.J., López-Jiménez, P.A. (2016). “Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump”. Environmental Modelling Software. 80, 322–335.
- Bayón, A., Toro, J.P., Bombardelli, F.A., Matos, J. y López-Jiménez, P.A. (2017). “Influence of VOF technique, turbulence model and discretization scheme on the numerical simulation of the non-aerated, skimming flow in stepped spillways”, Journal of Hydro-environment Research (in press).
- Boes, R. M., y Hager, W. H. (2003). “Hydraulic design of stepped spillways”. Journal of Hydraulic Engineering, 129(9), 671-679.
- Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H. y Raad, P. E. (2008), Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. Journal of Fluids Engineering, 130(7), 1–4.
- Gargano, R., y Hager, W. H. (2002). Supercritical flow across sewer manholes. Journal of Hydraulic Engineering, 128(11), 1014-1017.

# Construcción e implementación de sondas de conductividad para la medición de flujos bifásicos agua-aire

## *Construction and implementation of conductivity probes for the measurement of two-phase water-air flows*

(Recepción 01/03/2019; Aceptación 21/06/2019)

Ortega P.R.<sup>1,2</sup>; Marco F.<sup>1</sup>; Castillo L.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas

Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)

Paseo Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena, España

Teléfono: 868071014

<sup>2</sup> Escuela Politécnica Nacional

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental Quito, Ecuador

Email: patricio.ortega@epn.edu.ec

**Resumen.** Los flujos bifásicos agua- aire representan uno de los fenómenos más estudiados en la naturaleza. Estos flujos poseen características particulares a las de los flujos monofásicos, por lo que necesita una instrumentación particular para su correcta medición, ya que la instrumentación tradicional no es suficiente para este propósito. Para el presente trabajo se han elaborado dos sondas de conductividad, de una y dos puntas respectivamente, que permiten medir en un resalto hidráulico la concentración también conocida como fracción de vacío, la frecuencia de interferencia, el número de burbujas, la velocidad media agua-aire y la longitud de cuerda de las burbujas. Aunque esta instrumentación es de tipo intrusivo, permite registrar el cambio de fase agua-aire por efecto de la resistividad/conductividad de ambas fases.

**Palabras clave.** Concentración de aire; frecuencia de interferencia; resalto hidráulico; sonda de conductividad.

**Abstract.** Two-phase water-air flows are one of the most studied phenomena in nature. These flows have specific characteristics; as a result, adequate instrumentation should be used to measure them correctly. In this work, two conductivity probes have been elaborated, with one and two tips respectively, which allow us to measure the concentration also known as void fraction, the interference frequency, the number of bubbles, the average water-air velocity and bubble chord length in a hydraulic jump. Although this instrumentation is of the intrusive type it allows registering the water-air phase change due to the resistivity/conductivity of both phases.

**Keywords.** Air concentration; conductivity probe; hydraulic jumps; interference frequency.

## 1. Introducción

Tanto en la naturaleza como en las estructuras hidráulicas es muy común encontrar flujos bifásicos agua-aire altamente turbulentos, como por ejemplo en cascadas, oleajes, ríos, disipadores de energía o rápidas lisas o escalonadas. La introducción de aire en la masa de agua provoca que esta cambie sus propiedades, determinándose así, dos tipos de procesos de introducción de aire. Uno conocido como aeración local y otro denominado aireación continua (Chanson, 2004).

Para medir las características hidrodinámicas del agua se han utilizado equipos de medición clásicos (e.g. Tubo Pitot, limnímetros) los cuales se ven afectados por el ingreso de aire que incrementa erróneamente la concentración. Para flujos altamente aireados donde la concentración de aire es mayor a 5%, es necesario el uso de instrumentación especial

de carácter intrusivo (e.g. fibra óptica, sonda de conductividad) (Chanson et al., 2007).

Esta instrumentación permite detectar y registrar los cambios de fase agua-aire en un flujo altamente aireado. Mediante un procesamiento de señales se pueden obtener parámetros tales como la concentración de aire, la frecuencia de interferencia, la distribución de frecuencia de burbuja y la velocidad media de flujo.

## 2. Metodología

Las propiedades del flujo agua-aire fueron medidas utilizando sondas de conductividad para la detección del cambio de fases. El principio de este tipo de sondas se basa en la diferente resistividad que poseen el agua y el aire (Toombes, 2002), puesto que la resistividad del aire es mil veces más grande que la resistividad del agua.



Las sondas de conductividad fueron elaboradas y construidas en la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), España. Un detalle de las sondas se indica a continuación en la Tabla 1 y Figura 1.

Tabla 1. Detalle de las sondas de conductividad.

Tipo de Sonda	Diámetro Punta [mm]	$\Delta x$ [mm]	$\Delta y$ [mm]	Frecuencia muestreo [kHz]	Tiempo muestreo [s]
Una punta	0.25	-	-	5 10	180 90
Dos puntas	0.25	1.24	1.09	10	90



Figura 1. Detalle de la sonda de conductividad de dos puntas.

Las sondas de conductividad de una punta generan información de concentración de aire ( $C$ ), número de burbujas y frecuencia de interferencia ( $F_a$ ), pero no de valores de velocidad ( $v$ ), ni de longitud de burbuja. Una segunda sonda de dos puntas fue desarrollada en la UPCT. Esta permite comparar dos señales al mismo tiempo, y mediante la técnica de correlación cruzada es posible obtener el tiempo de desfase entre las dos señales. El coeficiente de correlación varía en función del tiempo de desfase y se expresa mediante un correlograma.

El tiempo de desfase ( $\Delta t$ ) de las señales corresponde al valor máximo del coeficiente de correlación, y es el tiempo promedio que tarda la burbuja en viajar desde la punta 1 a la punta 2. Si la distancia entre las puntas es conocida se puede conocer la velocidad media del flujo bifásico.

En la Figura 2 se indica la forma como la sonda de conductividad registra las burbujas de aire, el desfase entre las dos señales y los diferentes voltajes para el agua y el aire. Un sistema de adquisición de datos permite registrar las señales analógicas de las sondas. Estas señales son transformadas a una señal cuadrada binaria mediante un script escrito en MATLAB, y mediante un procesamiento de señales, se pueden obtener las características antes mencionadas.

En la Figura 3 se observa el registro de una señal analógica para la sonda de una punta y sus diferentes voltajes. Se definió un umbral de 2.5 voltios para el procesamiento y cambio de la señal analógica a binaria.

Para la selección del umbral se ha utilizado el criterio de umbral simple (Felder, 2013). Esta técnica estima un voltaje característico entre los voltajes de agua y aire de tal manera que la señal cuadrada procesada contiene rangos aceptables de duración y tamaño de burbuja.

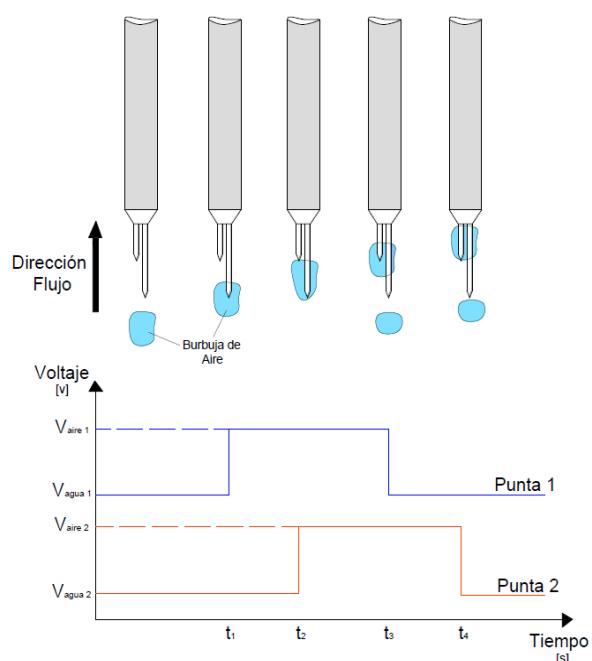


Figura 2. Esquema de la detección de burbujas, sonda de resistividad de dos puntas y generación de señal cuadrada binaria.

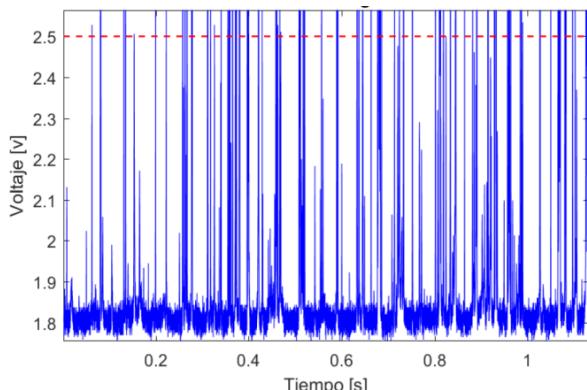


Figura 3. Señal analógica, sonda de resistividad de una punta. Frecuencia de muestreo de 5KHz, con un umbral de 2.5 voltios.

La señal medida en la sonda de conductividad puede ser usada para medir la longitud de cuerda de las burbujas ( $C_{ha}$ ), como producto de la velocidad media de flujo y el tiempo de contacto de la sonda con el aire, expresada mediante de la siguiente expresión:

$$C_{ha} = v \cdot \Delta t_a \quad (1)$$

Las condiciones experimentales del presente trabajo son el muestreo, con dos sondas de conductividad, de una y dos puntas respectivamente, en un resalto hidráulico. En la Tabla 2 se muestran las características del resalto hidráulico ensayado.

Tabla 2. Características del resalto hidráulico.

$Q$ [L/s]	$x_a$ [m]	$y_a$ [m]	$b$ [m]	$a$ [m]	$Fr$
10.8	0.35	0.015 0.030	0.30	0.05	7.6

donde ( $Q$ ) es el caudal ensayado, ( $x_a$ ) la distancia a la compuerta, ( $y_a$ ) la altura medida desde el fondo del canal, ( $b$ ) el ancho del canal, ( $a$ ) la apertura de la

compuerta, ( $Fr$ ) el número de Froude y ( $L_r$ ) la longitud, el resalto hidráulico medido en laboratorio se muestra en la Figura 4.

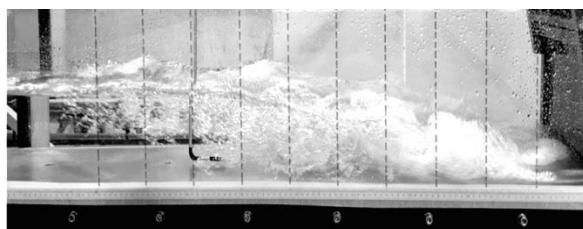


Figura 4. Resalto hidráulico ensayo ( $Q=10.8 \text{ l/s}$ ,  $F_r=7.5$ ,  $L_r=0.87 \text{ m}$ ,  $b=0.30 \text{ m}$ ).

En la Tabla 3 se muestra una comparativa de resultados de concentración, frecuencia de interferencia y número de burbujas para frecuencias de medición de 5 kHz y 10 kHz. Para un mismo umbral, se obtienen valores de concentración muy similares en ambos casos. Sin embargo, los valores de frecuencia y número de burbujas son diferentes, ya que en la medición realizada a 10 kHz los valores son muy superiores. Esto es debido a la capacidad de detección que tiene una sonda asociado a una frecuencia, ya que al medir a una mayor frecuencia la sonda es capaz de detectar burbujas de menores tamaños.

Tabla 3. Valores de concentración, frecuencia de interferencia y número de burbujas en el resalto hidráulico ( $Q=10.8 \text{ l/s}$ ,  $F_r=7.5$ ,  $y_i=0.013 \text{ m}$ ,  $L_r=0.87 \text{ m}$ ,  $x_a=0.35 \text{ m}$ ,  $y_a=0.03 \text{ m}$ ).

Frecuencia de medición [kHz]	Umbral [v]	$C$ [-]	$F$ [Hz]	Nº de burbujas
5	2.5	0.09075	31.361	5645
10	2.5	0.084401	134.96	12147

En la Figura 5 se muestra la distribución vertical de la concentración de aire en un resalto hidráulico, donde ( $d_1$ ) es el calado de agua a la salida de la compuerta.

Los valores registrados fueron medidos con la sonda de conductividad y con un equipo de fibra óptica de la casa RBI-Instrumentation, la distribución en la concentración medida con ambas instrumentaciones muestra una tendencia similar con la presentada en la bibliografía (Hang 2014).

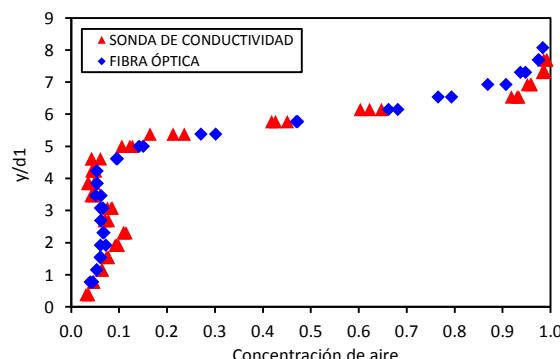


Figura 5. Distribución vertical de la concentración de aire en un resalto hidráulico ( $Q=10.8 \text{ l/s}$ ,  $F_r=7.5$ ,  $L_r=0.87 \text{ m}$ ,  $b=0.30 \text{ m}$ ).

En la práctica no solo se registran burbujas de aire de un mismo tamaño, sino un rango de tamaño de

burbujas. De esta forma lo más recomendable es presentarlo como una distribución de longitudes de cuerda de las burbujas en forma de probabilidad de ocurrencia. En la Figura 6 se indica la distribución de tamaños de burbuja a una probabilidad asociada, y su respectiva función para una velocidad de 2.21 m/s medida en el punto  $x_a$ ,  $y_a$  para la punta 1 y punta 2.

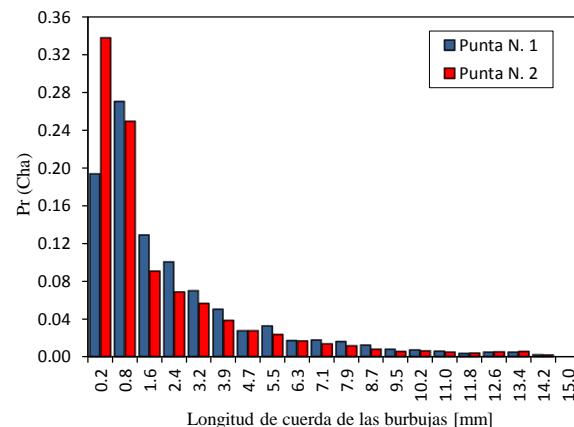


Figura 6. Distribución de la probabilidad de ocurrencia de la longitud de cuerda de las burbujas ( $Q=10.8 \text{ l/s}$ ,  $v=2.21 \text{ m/s}$ ,  $F_r=7.5$ ,  $y_i=0.013 \text{ m}$ ,  $L_r=0.87 \text{ m}$ ,  $x_a=0.35 \text{ m}$ ,  $y_a=0.03 \text{ m}$ ).

### 3. Conclusiones

Los valores experimentales de concentración medidos con la sonda de conductividad/resistividad son semejantes a los valores medidos con el equipo de fibra óptica. El proceso de calibración de la sonda de conductividad es muy importante para definir el umbral de corte para el tratamiento y procesamiento de las señales y obtención de resultados.

La longitud de cuerda con mayor probabilidad de ocurrencia es del orden de 1.0mm para resalto no desarrollados con números de Froude de 7.6. La variación de la frecuencia de medición de la sonda afecta el número de burbujas detectadas, según los resultados de este trabajo se recomienda el registro de burbujas con frecuencias iguales o mayores a 10kHz.

### Agradecimientos

El primer autor agradece la ayuda económica facilitada por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador en base al programa de movilidad de profesorado para realizar estudios de doctorado. De igual manera, el segundo autor agradece al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por la ayuda financiera recibida de la beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU), número de referencia FPU16/05658.

### Referencias

- Chanson, H. (2004). "Air-water flows in water engineering and hydraulic structures. Basic processes and metrology" Hydraulics of Dams and River Structures 2004; 3-16.

- Chanson, H. Carosi G. (2007). "Advanced post-processing and correlation analyses in high-velocity air-water flows" *Environmental Fluid Mechanics* 2007; 495-508.
- Felder, S. (2013). "Air-Water Flow Properties on Stepped Spillways for Embankment Dams: Aeration, Energy Dissipation and Turbulence on Uniform, Non-Uniform and Pooled Stepped Chutes" *PhD Thesis*. School of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia.
- Hang, W. (2014) "Turbulence and Air Entrainment in Hydraulic Jumps" *PhD Thesis*.
- School of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia.
- Murzyn, F. Chanson, H. (2009). "Experimental investigation of bubbly flow and turbulence in hydraulic jumps" *Environmental Fluid Mechanics*, 2009; 143-159.
- Toombes, L. (2002). "Experimental study of air-water flow properties on low-gradient stepped cascades" *PhD Thesis*. School of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia.

# Modelación de nutrientes y evaluación de uso de suelo usando la herramienta de agua y suelo (SWAT), Caso de estudio: Cuenca del Río Coca

## *Nutrient modelling and land use assessment using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), Case study: Coca River Basin*

(Recepción 01/03/2019; Aceptación 25/06/2019)

Narváez M.<sup>1\*</sup>, López C.<sup>1</sup>, Reinoso I.<sup>1</sup>, Minaya V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escuela Politécnica Nacional, Ladrón de Guevara E11-253, Quito, Ecuador

\*Email: manuel.narvaez@epn.edu.ec

**Resumen.** La contaminación de los ríos con nutrientes por fuentes no puntuales es un problema grave a nivel mundial debido al cambio en el uso de la tierra y la mala gestión de los fertilizantes. Este estudio pretende evaluar las dinámicas del nitrógeno y fósforo en la cuenca del río Coca y cómo se comportarían en tres escenarios hipotéticos de cambio de cobertura y uso de suelo usando un modelo que integre tanto aspectos hidrológicos como las dinámicas de nutrientes. Los resultados revelan que en los escenarios BAU (Business As Usual) y DEG (degradación) existe un incremento significativo en las pérdidas de nutrientes del suelo, contribuyendo negativamente en la calidad del agua del río.

**Palabras clave.** calidad de agua; modelación de nutrientes; SWAT; mejores prácticas de manejo; ganadería; Ecuador.

**Abstract.** The river pollution with nutrients through non-point sources is a serious problem worldwide, mainly due to the land use change and poor management of fertilizers. This study aims to evaluate the nitrogen and phosphorus dynamics in the Coca River Basin and how they vary for three hypothetical land use and land cover change scenarios using a model that integrates both hydrology and nutrient dynamics. The results reveal that in the BAU (Business As Usual) and DEG (degradation) scenarios, there is a significant increase in soil nutrient losses, thus contributing negatively to the river's water quality.

**Keywords.** water quality; nutrient modeling; SWAT; best management practices; livestock; Ecuador.

## 1. Introducción

Las actividades agrícolas y ganaderas aportan grandes cantidades de contaminantes a los ríos debido al uso no moderado de fertilizantes y la frecuente intensidad de la ganadería (Alfaro & Salazar, 2005). La escasa planificación de las zonas agrícolas y ganaderas puede intervenir en la calidad del recurso hídrico, afectando principalmente a los ecosistemas locales. Además, el proceso de lluvia - escorrentía contribuye con la contaminación difusa, en donde el nitrato se mueve en solución de aguas de escurrimiento y el fósforo se transporta adsorbido en los sedimentos (Vazquez-Amabile et al., 2017). La integración de nutrientes en modelos hidrológicos permite realizar un análisis de buenas prácticas de manejo en la cuenca, mediante la simulación y comparación de escenarios de cambio de cobertura y uso del suelo (Geng et al., 2015).

La modelación numérica de ríos desarrollada en Ecuador ha sido estudiada en aspectos de cantidad (Pidal & Borja, 2015) y calidad (Matovelle, 2016) por separado. Además, estudios sobre nutrientes y contaminación difusa han sido escasos y se limitan a la investigación del nitrógeno y fósforo sin tomar en cuenta los procesos hidrológicos (Homeier et al., 2010).

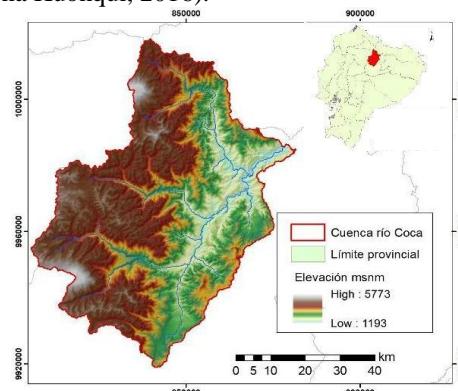
El presente estudio plantea el análisis del transporte de nutrientes en la cuenca del río Coca por medio de la integración del modelo hidrológico desarrollado en

SWAT (Torres et al., 2017) y la evaluación de tres escenarios de cambio de cobertura y uso de suelo. Comparando estos escenarios se obtendrán los porcentajes de cambio en la concentración de nitrógeno y fósforo en la estación al cierre de la cuenca.

## 2. Metodología

### 2.1. Descripción del sitio

La cuenca del río Coca (3296 km<sup>2</sup>) (Figura 1) se caracteriza por tener una precipitación media anual de 2950mm/año, una temperatura media anual de 15.4°C y una humedad relativa entre 84 y 93% (Horna Kuonqui, 2016).



i a Ubicación de la cuenca del Río Coca.



Revista Hidrolatinoamericana, ISSN: 2520-2960.

© 2019 International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR).

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

La cobertura vegetal está dominada principalmente por bosque nativo, páramo y pastizales. Los pastizales que se encuentran en la cuenca son utilizados para actividades ganaderas, siendo esta la principal actividad productiva (Torres et. al, 2017).

## 2.2. Modelo SWAT

Soil Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold et al., 2012) es un modelo lluvia - escorrentía de cuenca, en base física, semi-distribuido en función de Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) que operan en una base de información climática diaria que es computacionalmente eficiente para simular largos períodos de tiempo. El modelo simula el transporte de contaminantes a través de la escorrentía superficial tomando en cuenta la solubilidad, coeficiente de absorción de carbono y degradación de acuerdo con la cinética del contaminante.

El uso de nitrógeno por planta se estima con el suministro y la demanda (Williams et al., 1984). Cuando la demanda excede el suministro, existe un estrés nutricional. Las cantidades de nitratos ( $NO_3 - N$ ) se transportan por escurrimiento, flujo lateral y percolación. Para el transporte orgánico de N con sedimento se usa una función de carga que se aplica a eventos individuales de escorrentía (McElroy et al., 1976). El fósforo (P) sigue un enfoque similar al nitrógeno. La cantidad de fósforo soluble eliminado en la escorrentía se predice usando la concentración en los 10 mm superiores del suelo (Neitsch et al., 2010), el volumen de escorrentía y un factor de participación.

### Modelación hidrológica

Se utilizó información climática de siete estaciones con datos de precipitación, temperatura máxima y mínima, velocidad de viento y humedad relativa (Horna Kuonqui, 2016), modelo digital de elevación (SRTM), Drenajes (IGM), tipo de suelo y cobertura vegetal (MAGAP) y datos de nutrientes (Soto & Reina, 2012).

Los parámetros de velocidad del viento, punto de rocío y radiación solar se analizaron de forma mensual para incorporarlas al generador de clima que posee el modelo, mientras que precipitación y temperatura se ingresó de forma diaria. La definición de las URH se la realizó incorporando la información cartográfica del tipo de suelo de la cobertura vegetal y de pendientes. El cierre se lo realizó en la estación H0714 (Coca en San Rafael). Adicionalmente, se añadió el gradiente de temperatura respecto a la altura con un valor de  $-5.35^{\circ}\text{C km}^{-1}$ . Debido que en el área de estudio no se encontró relación entre la precipitación y la altura, se optó por ubicar estaciones virtuales de precipitación en las subcuenca que no disponían de esta información; tomando en cuenta las isoyetas y el régimen de precipitación presentado en el estudio de Horna Kuonqui (2016).

Los métodos para el cálculo de los componentes del ciclo hidrológicos fueron: 1) Evapotranspiración

Potencial: Método de Penman-Monteith, 2) Método de Infiltración - Escorrentía: Método Lluvia diaria / CN / Ruta Diario, y 3) Transporte del Agua en los canales: Método de Muskingum. La simulación se realizó con un paso a nivel mensual; el periodo fue desde 1979 a 1986, en donde los tres primeros años son de calentamiento, los siguientes cinco años para calibración y los tres últimos para validación.

### Modelación de nutrientes

En el SWAT, el ciclo de los nutrientes es complejo y comprende varios procesos, para el nitrógeno se tiene 27 parámetros y para el fósforo 22 parámetros (Arnold et al., 2012). En el área de estudio, la principal fuente de nutrientes es el abono proveniente del ganado que se encuentra suelto en los pastizales, por lo que para su modelación en SWAT se utilizó la opción "Continuous application of fertilizer" (Neitsch et al., 2010).

## 2.3. Escenarios

La dinámica de nutrientes en la cuenca se evaluó mediante la comparación de tres escenarios de cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS) al año 2030; el cual se alinea al criterio de tiempo óptimo para implementación y evaluación de políticas (ONU, 2016). Esta comparación se realizó respecto al escenario Base que corresponde a la cobertura de suelo histórica de 1990.

El escenario BAU (Business As Usual) presenta las condiciones y actividades actuales (año 2014) de la cuenca proyectadas al 2030 (Alpizar & Bovarnick, 2013). Este escenario fue determinado mediante la aplicación de Land Change Modeler, modelo incorporado en el programa TerrSet, que permite mediante coberturas pasadas y variables explicativas, escenificar prácticas futuras con métodos de validación automáticos (Mas et al., 2010). En el modelo de predicción de cambios se utilizan las coberturas históricas de los años: 2000, 2009 y 2014; y las cinco variables explicativas: modelo digital de elevaciones, evidencia de cambios, distancia a cambios, distancia a asentamientos y distancia a vías.

El escenario Degradación (DEG) representa un enfoque contrario a buen manejo del suelo, en donde hay una pérdida no controlada de vegetación natural y se prioriza el crecimiento de actividades ganaderas. En la dinámica de cambio se establece al sistema vial como punto de partida para el crecimiento de la ganadería extensiva (pastizal).

El escenario Best Management Practices (BMP) incorpora un nuevo esquema de gestión en la cuenca (Torres et al., 2017), en donde se propone restaurar zonas de pastizal hacia bosque ubicadas en bancos de ríos y áreas de importancia hídrica. Además promover el cambio del área restante de pastizal hacia sistemas silvopastoriles (68.06% del pastizal que se registra en la última actualización de la cobertura y uso de suelo (CUS) proporcionada por el



Ministerio de Agricultura de Ecuador correspondiente al 2014).

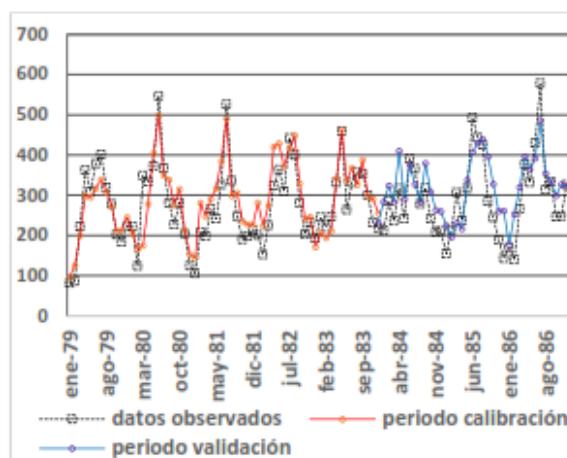
Las CUS del área de estudio se clasificaron en 6 tipos de acuerdo al escenario: páramo (PAR), bosque nativo (BQN), bosque restaurado (BQR), pastizal (PAS), áreas silvopastoriles (ASP) y otros (OTR) (Tabla 1).

Áreas y porcentajes de coberturas y usos de suelo de la cuenca del Río Coca						
Escenario	Tipo de cobertura y uso de suelo (Km <sup>2</sup> )					
	PAR	BQN	BQR	PAS	ASP	OTR
Base	1218.4	2326.1	-	224.5	-	85.2
BAU	1208.6	1843.4	-	708.6	-	93.6
DEG	1163.6	1696.6	-	878.6	-	115.3
BMP	1216.78	2109.5	183.1	-	252.9	91.8

### 3. Resultados

#### 3.1. Eficiencia del modelo

Según la clasificación de Moriasi et al. (2007) el modelo mostró gran eficiencia tanto en la calibración ( $NSE= 0.74$ ,  $PBIAS=-5.1$ ,  $RSR=0.5$ ) como en la validación ( $NSE=0.62$ ,  $PBIAS=-9.71$ ,  $RSR=0.28$ ) (Figura 2).



i a Caudales líquidos simulados y observados (H0714 Coca en San Rafael)

#### 3.2. Simulación de escenarios

Se estimó las pérdidas de nitrógeno y fósforo por hectárea en toda la cuenca, en donde se aprecia que dependen del escenario. Existe una alta pérdida de N y P en los escenarios DEG y BAU, mientras que BMP tiene una disminución significativa en la pérdida de nutrientes.

La Tabla 2 muestra que las concentraciones de nutrientes en el río Coca en el escenario base son similares en magnitud con los valores de nitratos (0.2 mg/L) y fosfatos (<0.1 mg/L) obtenidos en el estudio de Soto y Reina (2012). En la Tabla 3 se presentan los resultados de pérdida de nitrógeno en kilogramos por hectárea (kg/ha).

Dentro de los resultados se aprecia un alto porcentaje de aumento en la concentración de nutrientes en el cauce del río en los escenarios BAU y DEG, mientras

que el escenario de BMP muestra una disminución de las concentraciones hasta llegar a valores del escenario base. Esto último puede provocarse debido a que la conversión de pastizales en áreas silvopastoriles, las cuales retienen de mejor forma los nitratos y fosfatos.

a a Concentraciones de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) en el cierre de la cuenca del río Coca para los diferentes escenarios

	Base	BAU	DEG	BMP
Nitrógeno (mg/L)	0,24	0,30	0,38	0,24
% de cambio	-	23,9	60,3	2,1
Fósforo (mg/L)	0,02	0,03	0,04	0,01
% de cambio	-	107,9	129,0	-27,6

a a Pérdidas de Nitratos en kg/ha (promedio anual) para los diferentes escenarios

	Base	BAU	DEG	BMP				
N Orgánico	34.05	40.8%	55.35	46.9%	44.87	37.6%	29.20	37.1%
N en Escorrentía	0.18	0.2%	0.30	0.3%	0.50	0.4%	0.16	0.2%
N lixiviado	44.15	52.9%	55.53	47.0%	65.02	54.5%	43.93	55.9%
N en Flujo Lateral	3.59	4.3%	5.05	4.3%	6.82	5.7%	3.91	5.0%
N en Flujo Subterráneo	1.52	1.8%	1.83	1.6%	2.01	1.7%	1.43	1.8%
Total de Pérdidas	83.517		118.06		119.211		78.62	

### Conclusiones

Los resultados de la simulación de los caudales líquidos indican que el modelo SWAT es capaz de reproducirlos adecuadamente a escala mensual. Los indicadores de eficiencia indican un modelo satisfactorio, en un rango catalogado como bueno y muy bueno (Moriasi et al., 2007).

El escenario BMP muestra menor pérdida de nutrientes respecto al escenario base y disminución de sus concentraciones en el cauce del río, con lo cual se demuestra que la implementación de sistemas silvopastoriles y restauración de áreas degradadas contribuyen positivamente en la calidad del agua de los ríos de acuerdo con la simulación realizada.

En los resultados de las simulaciones se observan valores altos de pérdida de nitratos por hectárea, siendo el nitrato lixiviado el de mayor porcentaje de pérdida. Sin embargo, dichos cambios no se reflejan en las concentraciones de los ríos. Este fenómeno puede ocurrir debido a los procesos de dilución y al alto porcentaje de conservación de vegetación natural en la cuenca.

Esta investigación tomó como punto de comparación del escenario Base a las concentraciones de nutrientes, debido a la falta de información disponible. Para validar los resultados de pérdidas de nutrientes por hectárea se recomienda comparar con valores medidos en campo. No obstante, se pudo

prescindir de esta información ya que el objetivo del estudio fue contrastar las pérdidas de nutrientes de la cuenca de acuerdo a diferentes escenarios de CCUS.

## Referencias

- Alfaro, M., & Salazar, F. (2005). Ganadería y contaminación difusa, implicancias para el sur de Chile. *Agricultura Técnica*, 65(3), 330-340.
- Alpizar, F. & A. Bovarnick. 2013. "Targeted Scenario Analysis: A New Approach to Capturing and Presenting Ecosystem Services Values for Decision Making." UNDP, Washington.
- Arnold, J. G., et al. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Geng, J. J., et al. (2015). Nutrients and contaminants in tissues of five fish species obtained from Shanghai markets: risk–benefit evaluation from human health perspectives. *Science of the Total Environment*, 536, 933-945.
- Homeier, J., et al. (2010). Tree diversity, forest structure and productivity along altitudinal and topographical gradients in a species-rich Ecuadorian montane rain forest. *Biotropica*, 42(2), 140-148.
- Horna Kuonqui, L. N. (2016). Evaluación hidrometeorológica y de sedimentos en la cuenca del río coca en la zona de influencia del proyecto coca codo sinclair (Bachelor's thesis, Quito, 2016.).
- Mas, J.F., et al. 2010. "Una Comparación de Diferentes Enfoques de Modelación de Cambios de Cobertura/Uso Del Suelo." P. CD in XIV Simposio Internacional SELPER 2010.
- Matovelle, C. (2016). Desarrollo de un modelo de calidad de agua para la microcuenca del río Tabacay, cuenca del río Paute en la ciudad de Azogues. Ecuador.
- McElroy, A.D., et al., 1976. Loading functions for assessment of water pollution from nonpoint sources. Environmental Protection Technical Services. EPA 600/ 2-76-151.
- Moriasi, D. N., et al. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Neitsch S. L., et al. (2010). Soil and Water Assessment Tool. User's Manual, Version 2009. Texas Water Resources Institute. Technical Report No. 365, Texas, 643 pp.
- ONU. 2016. Agenda 2030 y Los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una Oportunidad Para América Latina y El Caribe.
- Pidal, J. R. H., & Borja, D. B. (2015). Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil & Water assessment tool) para análisis del caudal de escorrentía superficial en la cuenca hidrográfica del río las juntas. *revista geoespacial*, 12, 106-122.
- Soto, C., & Reina, E. (2012). Análisis de la calidad del agua en la subcuenca del río Coca. Estudio técnico: DNCA-DHN-12-01. Coca, Ecuador: Secretaría Nacional del Agua
- Torres, M., et al. (2017). Informe No. 3: Evaluación Biofísica de la Cuenca del Río Coca y Valoración Económica de los Servicios Ecosistémicos (Multidisciplinary Report No. 3). Quito, Ecuador: United Nations Environment Program - Escuela Politécnica Nacional.
- Vazquez-Amabile, G., et al. (2017). Análisis de agroquímicos y nitratos en cursos y aguas subterránea de cuencas rurales del oeste y sudeste de Buenos Aires. *Productividad y medio ambiente*, 61.
- Williams, J.R., Jones, C.A., Dyke, P.A., 1984. A modeling approach to determine the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering* 27, 129e144.

# Evaluación de un separador de caudales para alcantarillado combinado aplicando la metodología CFD

## *Evaluation of flow separator for combined sewer system applying CFD methodology*

(Recepción 04/03/2019; Aceptación 02/07/2019)

Santamaría J.<sup>1</sup>; Hidalgo X.<sup>1</sup>; Ortega P.<sup>1</sup>; Casa E.<sup>1</sup>; Vera P.<sup>1</sup>; Galarza J<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Escuela Politécnica Nacional

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental Quito, Ecuador

Av. Ladrón de Guevara y Andalucía

Teléfono: (+593) 2 2976300

Email: jorge.santamaria@epn.edu.ec

**Resumen.** En alcantarillados combinados antes de su descarga en los ríos es necesario separar los caudales sanitarios y los caudales pluviales mediante estructuras separadoras de caudal. Estas estructuras separan el caudal sanitario proveniente de las ciudades y lo transportan hacia las plantas de tratamiento. En ciudades andinas debido a su fuerte topografía muchas veces estas estructuras funcionan en régimen supercrítico y altas velocidades. Para el presente estudio se analizó un diseño de separador de caudales muy utilizado en la ciudad de Quito con ayuda de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), metodología ampliamente utilizada en el diseño, evaluación y optimización de estructuras hidráulicas.

**Palabras clave.** Separador de caudales, alcantarillado combinado, CFD, RNG k-ε, ciudades andinas.

**Abstract.** In combined sewer system before their discharge into rivers, it is necessary to separate urban wastewater flows and rainwater flows by means of flow separation structures. These structures separate the sanitary flow coming from the cities and it is transported to the treatment plants. In Andean cities, due to their abrupt topography, these structures often operate in a supercritical regime and high speeds. For the present study, a flow separator very common in Quito was analyzed with Computational Fluid Dynamics (CFD), methodology used in the design, evaluation, and optimization of hydraulic structures.

**Keywords.** Flow separator, Combined Sewer Overflow CSO, CFD, RNG k-ε, Andean cities.

## 1. Introducción

Actualmente, en muchas ciudades existen sistemas de alcantarillado combinado que descargan sus aguas directamente a los ríos (Guhl et al, 2010). Gracias a un cambio de legislación es obligatorio depurar el caudal sanitario antes de la descarga. Para cumplir este propósito es necesario una estructura separadora de caudales combinados. Muchas ciudades están implantadas en la región andina, cuyas características son pendientes fuertes y una topografía abrupta. Esto ha ocasionado que gran parte de los sistemas de alcantarillado tengan pendientes fuertes y trabajen siempre en un régimen supercrítico ( $Froude > 1.0$ ).

Gracias al avance y desarrollo en computación, hoy en día la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una metodología accesible y ampliamente utilizada, siempre y cuando el modelo numérico sea validado y calibrado previamente. Los softwares CFD resuelven con gran aproximación la interacción de flujos con estructuras hidráulicas presentando un

sinnúmero de resultados que no se pueden obtener en el modelo físico por el grado de detalle (Ortega, 2015).

El propósito del presente trabajo es utilizar las ventajas de la metodología CFD para evaluar el funcionamiento hidráulico de una estructura separadora de caudales combinados y como afecta la pendiente de aproximación y el flujo en régimen supercrítico a la estructura hidráulica.

## 2. Metodología

### 2.1 Caso de estudio

El caso de estudio corresponde a un diseño de separador de caudales muy utilizado en la ciudad de Quito-Ecuador. Tiene un canal de aproximación de sección 1.80 m x 1.80 m y 2.87 % de pendiente longitudinal. En la zona de separación (al final del canal combinado) se sitúan: un umbral transversal trapezoidal de 0.6 m de alto x 2.0 m y hacia la margen izquierda un orificio rectangular de 0.6 m de alto x 1.9 m de ancho que descarga en el canal



sanitario de sección 1.2 m x 1.2 m y pendiente del 1% (EPMAPS 2012). Finalmente, a continuación del umbral inicia el canal de descarga hacia el río o cauce natural denominado canal pluvial de sección 2.0 m x 2.0 m y 0.47% de pendiente longitudinal. La Figura 1 presenta una vista tridimensional del separador de caudales analizado.

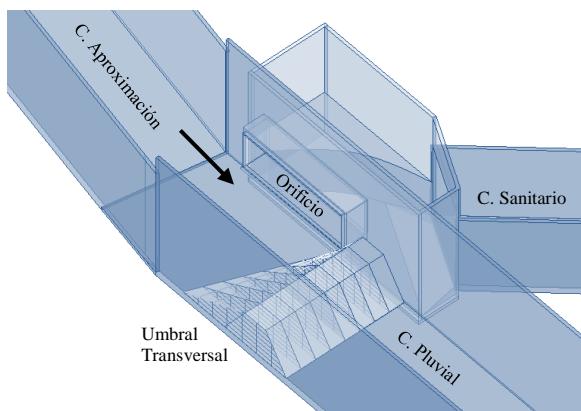


Figura 1. Vista tridimensional del separador de caudales, pendiente de aproximación 2.87 %, ancho canal 1.80 m, orificio rectangular lateral 0.60 m x 1.90 m en prototipo.

## 2.2 Modelo numérico

Para la simulación numérica se utilizó el software comercial de Dinámica de Fluidos Computacional ANSYS CFX 16.0. Este software utiliza el método de volúmenes finitos para la resolución de las ecuaciones conservativas utilizando la aproximación de las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes mejor conocidas como ecuaciones RANS, modelo que obtiene hasta un 90% de precisión en las variables medias del flujo (Viti, 2018). Para la solución del problema de cierre se utiliza un modelo de turbulencia de dos ecuaciones RNG k- $\epsilon$ , método ampliamente evaluado y considerado como el más ventajoso al momento de representar un fenómeno hidráulico (Sadegh et al., 2016; Dargahi, 2010; Bayon et al., 2017).

Para la discretización del dominio computacional se ha utilizado un mallado estructurado con elementos hexaédricos, el cual presenta mejores resultados que los elementos tetraédricos en la convergencia de la solución numérica, reduciendo el número de elementos considerablemente (Carrillo y Castillo, 2011). El análisis de convergencia de malla fue realizado utilizando la metodología del índice de convergencia de malla (CGI). A partir de una relación de refinamiento constante ( $r$ ) y de los valores de las variables (caudal pluvial  $Q_p$ Ansyst, caudal sanitario  $Q_s$ Ansyst), la metodología establece un orden de convergencia ( $p$ ), realiza la extrapolación de Richardson ( $Q_{h=0}$ ), calcula los índices de convergencia (GCI) y verifica el rango de convergencia asintótico (NASA, 2008). Como se puede observar en la Tabla 2, los valores de verificación cercanos a 1 confirman el rango de

convergencia asintótico y por consiguiente la independencia de malla.

Se establece 0.01 m para el tamaño del elemento, valor que como se observa en la Tabla 1 y Tabla 2 es independiente de la densidad de malla y no demanda una cantidad excesiva de recursos en el procesamiento, teniendo un total de 840 531 elementos y una relación de aspecto promedio de 1.37.

Tabla 1. Comparación entre diferentes tipos de mallado.

Mallado	$Q_p$ Ansyst	$Q_s$ Ansyst	Tamaño del elemento	Elementos	Tiempo total de simulación
	l/s	l/s	m	#	horas
A	78.100	12.550	0.01	840 531	12 horas
B	78.974	12.101	0.0075	1 982 325	27 horas
C	78.565	12.170	0.005	2 787 312	36 horas

Tabla 2. Resultados del análisis de convergencia de malla.

	$Q_p$ Ansyst	$Q_s$ Ansyst
$r$	1.414	1.414
$p$	2.187	5.425
$r^p$	2.134	6.555
$Q_{h=0}$	78.926 l/s	12.182 l/s
GCI - BC	0.575 %	0.127 %
GCI - AB	1.221 %	0.835 %
Verificación	<b>0.995</b>	<b>1.006</b>

Las condiciones de contorno utilizadas corresponden a los datos medidos en un modelo físico a escala 1:5 construido en el Laboratorio del CIERHI, el modelo utiliza el criterio de similitud de Froude. Como condición inicial se utiliza el caudal y calado medido en el tramo de aproximación y la salida corresponde a una condición abierta a la atmósfera (Presión = 0).

## 3. Análisis de resultados

Los caudales combinados ( $Q_t$ ) son derivados en un caudal sanitario ( $Q_s$ ) que va directamente a la planta de tratamiento y un caudal pluvial ( $Q_p$ ) que se descarga al río o cuerpo receptor (Andrade 2012). En la Tabla 3 se indica los caudales derivados tanto en el modelo físico (Lucero y Santamaría, 2018) como en el modelo numérico CFD en ANSYS CFX.

Tabla 3. Caudal sanitario  $Q_s$ , Caudal pluvial  $Q_p$  y Caudal total  $Q_t$  en Modelo físico escala 1:5 (Subíndice MF) y Simulación Numérica ANSYS CFX 16.0 (Subíndice Ansys).

Simulación	$Q_{sMF}$ (l/s)	$Q_{sAnsyst}$ (l/s)	$Q_{pMF}$ (l/s)	$Q_{pAnsyst}$ (l/s)	$Q_{tMF}$ (l/s)	$Q_{tAnsyst}$ (l/s)
A1	9.58	8.35	0.00	0.00	9.58	8.35
A2	10.67	9.21	0.00	0.00	10.67	9.21
A3	6.51	6.11	41.47	39.48	47.98	45.60
A4	7.96	8.00	52.90	50.16	60.86	58.16
A5	14.32	12.55	78.74	78.10	93.06	90.65

Como se puede observar en la Figura 2 y Figura 3, el modelo numérico reproduce el comportamiento de flujo obtenido en el modelo físico con las condiciones iniciales antes descritas. La Figura 2 presenta los valores de caudal pluvial y la Figura 3 presenta los

valores de caudal sanitario tanto para modelo numérico como para modelo físico. Se puede notar que tanto la pendiente de la línea de tendencia como el coeficiente  $R^2$  son cercanos a uno lo que quiere decir que los valores difieren dentro de un rango aceptable.

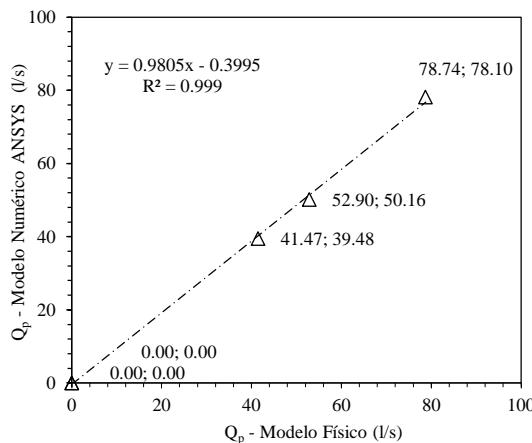


Figura 2. Correlación entre los valores de caudal pluvial obtenidos en modelo físico y modelo numérico.

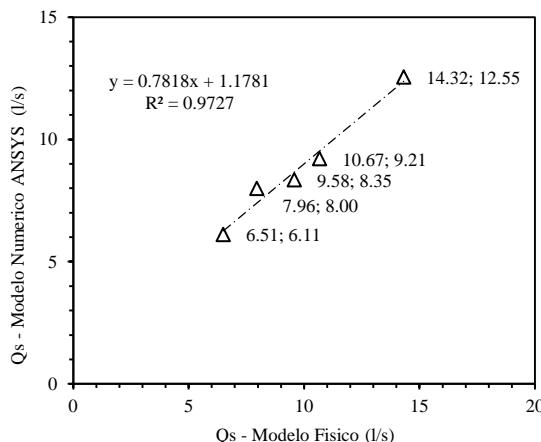


Figura 3. Correlación entre los valores de caudal sanitario obtenidos en modelo físico y modelo numérico.

Para caudales del orden de 10 l/s a 25 l/s equivalentes únicamente al caudal sanitario en época de verano la pared de cierre funciona correctamente. La pared desvía todo el caudal hacia el orificio rectangular lateral como se puede evidenciar en la Figura 4. Para caudales mayores (época de invierno) existe una separación de caudales, sin embargo, el flujo llega con alta velocidad y parte de este choca en la arista lateral del orificio.

En la Figura 5 se puede observar los resultados del modelo ANSYS CFX para un caudal de 9.58 l/s. Gracias al nivel de detalle del modelo numérico se evidencia zonas muertas de baja velocidad que podrían a futuro ocasionar problemas de sedimentación, sobre todo en épocas de verano.

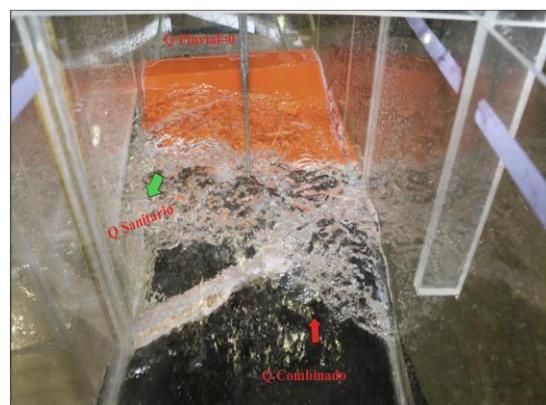


Figura 4. Modelo Físico escala 1:5, vista superior  $Q_s=9.58$  l/s,

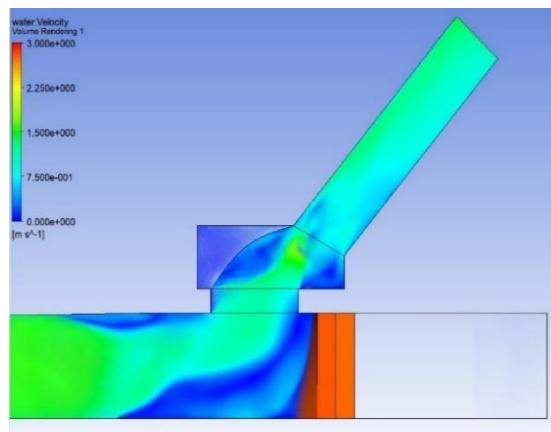


Figura 5. ANSYS CFX, Velocidades  $Q=9.58$  l/s,  $Fr=3.27$ ,  $Q_s=9.58$  l/s,  $Q_p=0.0$  l/s.

Uno de los aspectos evidenciados en el modelo físico es que, para caudales máximos se observa un choque del flujo en la arista recta del orificio rectangular lateral. Se vio la importancia de analizar las presiones para todo el rango de caudales con ayuda del modelo numérico CFD. En la Figura 6 se indica las presiones obtenidas a distintas alturas del orificio rectangular lateral y en el centro del umbral.

Es necesario señalar que el funcionamiento del separador de caudales en época de invierno (caudales mayores) no es el adecuado. El funcionamiento está directamente relacionado con la pendiente de aproximación del colector, flujos en régimen supercrítico y números de Froude altos ( $Froude \approx 3.5$ )

Como continuación del presente trabajo se deberá proponer una optimización al diseño utilizando las ventajas conjuntas del modelo físico escala 1:5 (Lucero y Santamaría, 2018) y de la metodología CFD (Ortega, 2015), planteando varias alternativas y adicionalmente considerando un análisis de concentraciones y balance de masas para la parte sanitaria (Calderón, 2017).

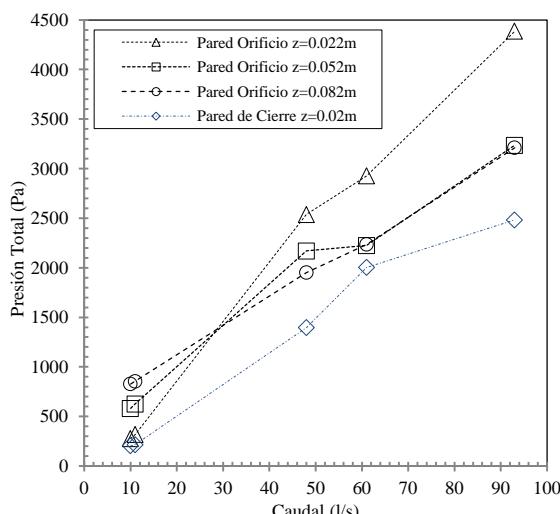


Figura 6. Presiones obtenidas en ANSYS CFX en la pared orificio y en la pared de cierre.

### 3. Conclusiones

Las estructuras separadoras de caudal son obras muy importantes en los sistemas de alcantarillado combinado. En ciudades andinas debido a las pendientes topográficas fuertes muchas estructuras deben trabajar con flujos en régimen supercrítico. La metodología CFD es una herramienta muy útil para evaluar el comportamiento hidráulico de una estructura. El paquete comercial ANSYS CFX y el modelo de turbulencia RNG k- $\epsilon$  reproduce el flujo de manera similar al ensayado en el modelo físico.

El separador de caudales evaluado funciona correctamente hasta un rango de caudales de 50 l/s, para caudales mayores debido a las altas velocidades se produce un choque en la parte lateral del orificio rectangular. El modelo numérico permite evaluar las presiones en esos puntos, ya que presiones demasiado altas pueden ocasionar daños en el hormigón de la estructura a corto y mediano plazo.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos CIERHI-EPN de la Escuela Politécnica Nacional por las facilidades y financiamiento brindado para la ejecución del proyecto de investigación.

### Referencias

- Andrade, L. (2012). "Diseño de la Red Metropolitana Ambiental de la Calidad del Recurso Hídrico, diagnóstico" Secretaría de Ambiente del DMQ.
- Bayón, A., Toro, J., Bombardelli, F., Matos, J., López P. (2017). "Influence of VOF technique, turbulence model and discretization scheme on the numerical simulation of the non-aerated, skimming flow in stepped spillways" Journal of Hydro-Environment Research 2017; 19:137-149.
- Calderón, D. (2017) "Modelación física de separadores de caudales hacia colectores pluvial y sanitario para alcantarillados combinados usados en ciudades andinas en Ecuador. Caso de descontaminación y recuperación del río Machángara en Quito" *Tesis Maestría*. Instituto de Ingeniería Sanitaria, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Carrillo, J. Castillo L. (2011). "Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo de flujos bifásicos con las técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional" IV Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT, Cartagena, España, pp. 33-35.
- Dargahi, B. (2010). "Flow characteristics of bottom outlets with moving gates" Journal of Hydraulic Research 2010; 48:4, 476-482.
- EPMAPS, (2012). "Estudios y Diseños Definitivos de los Sistemas de Alcantarillado de los Interceptores en el Río Machángara, Quebrada Caupicho" Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Saneamiento.
- Guhl, E., Montes, P., Encalada, G. (2010). "El agua de los Andes" Ed. Comunidad Andina. ISBN: 978-612-4054-31-0
- Lucero, C. Santamaría, J. (2018). "Estudio experimental en modelo físico de una estructura separadora de caudales con umbral transversal, orificio lateral y régimen de aproximación supercrítico, caso de estudio "Quebrada Caupicho" *Tesis Ingeniería*. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- National Aeronautics and Space Administration, NASA (2008). "Examining Spatial (Grid) Convergence", <https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html> (Recuperado: 05/06/2019)
- Ortega, P. (2015) "Simulación Numérica de una estructura separadora de caudales con metodología CFD aplicando el paquete computacional ANSYS CFX." *Tesis Maestría*. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- Sadegh, D., Abbas, P. (2016) "Numerical modeling of flow pattern in dam spillway's guide wall. Case study: Balaroud dam, Iran" Alexandria Engineering Journal 2016; 55:467-473
- Viti, N., Valero, D., Gualtieri, C. (2018). "Numerical Simulation of Hydraulic Jumps. Part 2: Recent Results and Future Outlook" Water 2018, 11:1.

# Usando R para una fácil y eficiente predicción de la incertidumbre de simulaciones de modelos ambientales

## *Using R to easily and efficiently predict the uncertainty in simulations of environmental models*

(Recepción 05/02/2019; Aceptación 02/07/2019)

Duque-Gardezábal N.<sup>1</sup>; Fuentes C.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH)

Departamento de ingeniería civil y agrícola, Universidad Nacional de Colombia-Bogotá, Colombia

Teléfono: +57 1 3165000 ext 13406

Email: nduqueg@unal.edu.co

**Resumen.** Determinar la incertidumbre en modelos medioambientales es una tarea demandante. Se presenta en este trabajo la implementación de la metodología de análisis de incertidumbre DDS-AU en un código de R y se compara la eficiencia del método contra el ampliamente usado GLUE con muestreo uniforme. Se encontró que DDS-AU tiene una mayor eficiencia para encontrar excelentes valores de la función objetivo que la metodología GLUE, incluso en este problema de 10 parámetros. Asimismo, el mejor resultado de la desviación respecto de los caudales observados se obtuvo al usar la metodología DDS-AU. El código se brinda para su libre uso.

**Palabras clave.** Código; DDS-AU; eficiencia de muestreo; incertidumbre paramétrica; alta dimensionalidad.

**Abstract.** Assessing the uncertainty in environmental models is a challenging task. We present in this research an implementation of the DDS-AU uncertainty analysis methodology and the code developed in R. Also, the efficiency of the DDS-AU is contrasted with the widely used GLUE with uniform random sampling. It was found that DDS-AU has a major efficiency when trying to find excellent objective function values with GLUE, even in this 10-parameter problem. Moreover, the best deviation of the simulated streamflows respect the observed discharge was obtained with the DDS-AU. The code is made freely available for its use.

**Keywords.** Code; DDS-AU; parameter uncertainty; sampling efficiency; high-dimensional.

## 1. Introducción

La modelación de sistemas ambientales es una herramienta de gran utilidad. En general, la modelación permite: conocer el entendimiento que se tiene del sistema analizado; buscar errores e inconsistencias en los datos, mediciones, o llenar la información; y probar las implicaciones de cambios en el sistema, lo que se conoce como escenarios. A estas utilidades también se puede incluir el conocimiento del valor de las variables en puntos no instrumentados.

Sin embargo, las modelaciones y las mediciones siempre están sujetas a cierto grado de incertidumbre. Ésta proviene principalmente de la determinación de parámetros, datos ingresados y estructura del modelo. De ellas la que más ampliamente se aborda es la incertidumbre paramétrica, que es estudiada en la mayoría de modelaciones con experimentos de Montecarlo y la ampliamente conocida metodología GLUE (Keith Beven & Binley, 1992).

Los experimentos de Montecarlo se basan en muestreos aleatorios que son altamente ineficientes para identificar buenos conjuntos de parámetros (Tolson & Shoemaker, 2008). Para abordar el problema de la ineficiencia y para reducir los requerimientos computacionales de las simulaciones, se han propuesto la construcción de metamodelos (modelos de modelos), o mejores técnicas de

muestreo como el Latin Hypercube Sampling (LHS). Dentro de estos últimos se encuentra la metodología Dynamical Dimension Search (DDS) – Analysis of Uncertainty (DDS-AU), propuesta por Tolson & Shoemaker (2008).

En consecuencia, este trabajo busca presentar los resultados obtenidos del análisis de incertidumbre usando la metodología DDS-AU, desarrollados con una herramienta creada en la plataforma R (R Core Team, 2017). Asimismo, se compara el desempeño del algoritmo DDS-AU contra la metodología GLUE con el ampliamente usado muestreo uniforme, en la calibración del modelo TOPMODEL (K Beven, Lamb, Quinn, Romanowicz, & Freer, 1995; Buytaert, 2018). La herramienta es de código abierto y está disponible en el siguiente enlace para su libre uso (<https://github.com/nduqueg/DDS-Aproximation-of-Uncertainty>), bajo el reconocimiento de Tolson & Shoemaker (2008), y de la implementación en R expuesta en este artículo.

## 2. DDS-AU y descripción del código

La metodología DDS-AU se fundamenta en el marco del concepto de equifinalidad y de los conjuntos de parámetros “comportamentales” (Keith Beven & Binley, 1992). Un umbral subjetivo debe ser definido por el modelador, que generalmente se basa en los resultados de una función objetivo (FO) y en el



número de simulaciones realizadas que tiene un comportamiento aceptable, bueno o muy bueno de acuerdo con esa FO. No obstante, DDS-AU busca atacar el problema de la baja probabilidad de muestreo cerca del óptimo global cuando se usa el muestreo uniforme.

Al estar en el marco de la metodología GLUE, el algoritmo DDS-AU se basa en identificar múltiples e independientes conjuntos de parámetros comportamentales. Para ello, utiliza  $N$  algoritmos DDS aleatorios e independientes (Tolson & Shoemaker, 2007). El algoritmo DDS se creó para obtener un buen resultado con un número limitado de simulaciones en problemas inversos dimensionalmente altos. Éste busca aleatoriamente cerca del mejor resultado que haya obtenido hasta la iteración  $i$ , pero se caracteriza por ir reduciendo el número de parámetros calibrados a medida que avanzan las iteraciones (Tolson & Shoemaker, 2007). Tolson & Shoemaker (2007) reportan con sus experimentos como el algoritmo DDS tiene, en muchos casos, un mejor desempeño que el ampliamente conocido Shuffled Complex Evolution (SCE) (Duan, Sorooshian, & Gupta, 1992). En consecuencia, DDS-AU escoge como parámetro comportamental el conjunto de parámetros con mejor F.O. para cada DDS independiente.

El código del DDS-AU se implementó como funciones en la plataforma R. Estas incluyen una función para: el algoritmo DDS, el DDS-AU, y una para el post-procesamiento de los resultados del DDS-AU. Siguiendo las sugerencias de Tolson & Shoemaker (2008), el código recibe el número máximo de simulaciones ( $N_{Total}$ ), la cantidad de muestras “comportamentales” que se quieren hallar ( $n_{Beh}$ ). Con base en estos datos, genera aleatoriamente el número de iteraciones que realiza cada uno de los DDS independientes en un intervalo. Dicho intervalo se crea basado en un porcentaje que ingresa el usuario y que se relaciona con el número de promedio iteraciones de los DDS independiente; este es igual a:

$$m_{DDS} = \frac{N_{Total}}{n_{Beh}} \quad (1)$$

El intervalo se extiende en el porcentaje hacia valores superiores e inferiores respecto de ese punto central.

### 3. Área de estudio y datos

La cuenca del río Casanare se encuentra en los llanos de la Orinoquía colombiana. Tiene un área de 14700 km<sup>2</sup> en su mayoría sobre las planicies, y la cuenca tiene su parte alta en la cordillera oriental de los Andes colombianos. Para los datos de precipitación, se crearon campos combinando datos del MSWEP (Beck et al., 2017), y de estaciones en tierra con la metodología Double Smoothing (Duque-Gardeazábal, Zamora, & Rodríguez, 2018). Para los datos de evapotranspiración, se descargaron los estimados de Penman-Monteith del proyecto earthH2Observe ([www.earth2observe.eu](http://www.earth2observe.eu)), debido a

que no se cuenta con estaciones de temperatura en la zona. El punto de cierre de la cuenca, y que también proporcionó las series de caudales observados, fue la estación Cravo Norte (LM-36027050). Todas las estaciones pluviométricas y limnimétricas usadas, pertenecen al Instituto de Meteorología, Hidrología y Estudios Ambientales (IDEAM).

### 4. Metodología

Para comparar las dos metodologías de análisis de incertidumbre, se definió como límite un total de 20.000 simulaciones del modelo TOPMODEL, en ambas metodologías. Este modelo se aplicó a la cuenca del río Casanare, calibrando 10 parámetros. Se hizo un muestreo uniforme para el caso de GLUE y para el DDS-AU se implementaron 50, 100 y 200 DDS independientes. Con esto se buscó aumentar o reducir el número de simulaciones en cada DDS, y lograr mejores o peores valores en la F.O. (se escogió para este estudio el ampliamente conocido Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). Los resultados de la F.O. se clasificaron mediante la variación del valor del umbral de comportamentales, analizando así la eficiencia del muestreo.

Asimismo, se graficaron las bandas envolventes de los caudales simulados con cada método. Así se obtuvieron métricas asociadas al contenido de datos observados que se encuentran dentro de las bandas de confianza. Las métricas fueron: el ancho medio, máximo y mínimo; la relación de contenido y la desviación del promedio de las simulaciones respecto de las observaciones. Cabe resaltar que las envolventes se calcularon con los caudales simulados únicamente con conjuntos de parámetros comportamentales. Para este procedimiento, se definió el valor de 0.5 como umbral de los conjuntos comportamentales.

### 5. Resultados

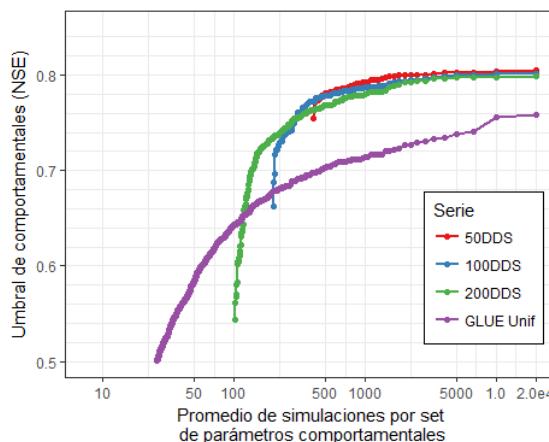


Figura 1. Simulaciones y cantidad de parámetros comportamentales variando el umbral de comportamentales definido

Para analizar las diferencias entre el muestreo uniforme y el DDS-AU, se halló la cantidad de simulaciones por cada conjunto comportamental. Este

cálculo indica la eficiencia de las metodologías de muestreo para hallar parámetros comportamentales. En la Fig. 1, se puede apreciar como dicha cantidad va cambiando a medida que se tienen valores más altos de la F.O. Se puede ver que para conjuntos que están alejados del máximo conocido de la F.O. (0.81), el muestreo uniforme tiene un mejor rendimiento. No obstante, la tendencia cambia después de un NSE de 0.65, en el que los valores comportamentales del DDS-AU con 200 conjuntos independientes obtiene valores más altos de la F.O. con el mismo número de simulaciones.

Igualmente, los DDS-AU con 50, 100 y 200 DDS, tienen una mejor eficiencia que el muestreo uniforme después del umbral de 0.68. Más importante aún, el muestreo uniforme no logró muestrear parámetros con NSE superiores a 0.76, mientras que la mayoría de los conjuntos de parámetros encontrados por los tres DDS-AU presentan F.O. mayores a ese valor. No existen mayores diferencias entre los tres DDS-AU implementados, solamente se debe resaltar que la corrida con 200 DDS presenta un leve menor desempeño que las corridas con 50 y 100 DDS, a causa de que cada uno de los 200 DDS independientes tiene un menor número de iteraciones. Lo anterior se debe a que el límite total de simulaciones fue de 20.000, con lo cual se asignan en promedio 400 iteraciones para los 50 DDS, 200 iteraciones para 100 y 100 iteraciones para los 200 DDS independientes.

En la Fig. 2 se pueden ver las bandas envolventes de las simulaciones. Es claro que las bandas más anchas son las producidas por el muestreo uniforme (GLUE), mientras que las más angostas son producidas por los DDS-AU, siendo la de 50 DDS la más angosta. Puede verse que las bandas producidas por GLUE presentan picos que desvían el desempeño general de las simulaciones, que se producen por ser construidas con conjuntos de parámetros comportamentales que no se encuentran cercanos al óptimo de la F.O.

Lo anterior es más claro al calcular las métricas de las bandas, como se muestra en la Tabla 1. Para este ejercicio se encontró que GLUE tiene la mayor

relación de contenido con 68.79 % pero el ancho promedio de las bandas es de 2 a 4 veces el ancho de los DDS-AU. El mayor contenido, usando el DDS-AU, se obtuvo con 200 DDS (57 %). La mejor desviación promedio respecto de los observados se obtuvo usando 100 DDS independientes ( $116.85 \text{ m}^3/\text{s}$ ), seguido de las otras pruebas con DDS-AU. Por su parte GLUE, tuvo una desviación aproximadamente 40 % mayor que los muestreos realizados con DDS-AU ( $182.97 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Tabla 1. Métricas asociadas a los anchos de banda (en  $\text{m}^3/\text{s}$ ) y a los datos observados contenidos en ellas.

	50DDS	100DDS	200DDS	GLUE
Ancho medio	238.81	326.09	529.29	1061.06
Ancho máximo	2200.69	2387.09	2477.63	8687.79
Ancho Mínimo	17.59	36.10	71.41	136.32
Relación de contenido	32.55 %	42.85 %	57.02 %	68.79 %
Desviación Prom. de la Amplitud	122.61	116.85	120.10	182.97

## 6. Conclusiones y recomendaciones

A partir de las metodologías DDS-AU y del muestreo uniforme, se investigó la eficiencia y la representatividad de las simulaciones del modelo TOPMODEL en la cuenca del río Casanare. Se confrontaron las dos metodologías por medio de un número limitado de simulaciones, garantizando así una comparación fidedigna de los ejercicios.

Se encontró que, incluso en un problema de solo 10 parámetros, el algoritmo DDS-AU tiene una mayor eficiencia que el muestreo uniforme. Igualmente, para este problema 10-dimensional, una baja cantidad de iteraciones por DDS no conlleva a obtener bajos resultados de la F.O. Para problemas inversos más complejos (modelos físicamente basados o con un gran número de parámetros), la complejidad de la F.O. puede requerir más iteraciones por DDS.

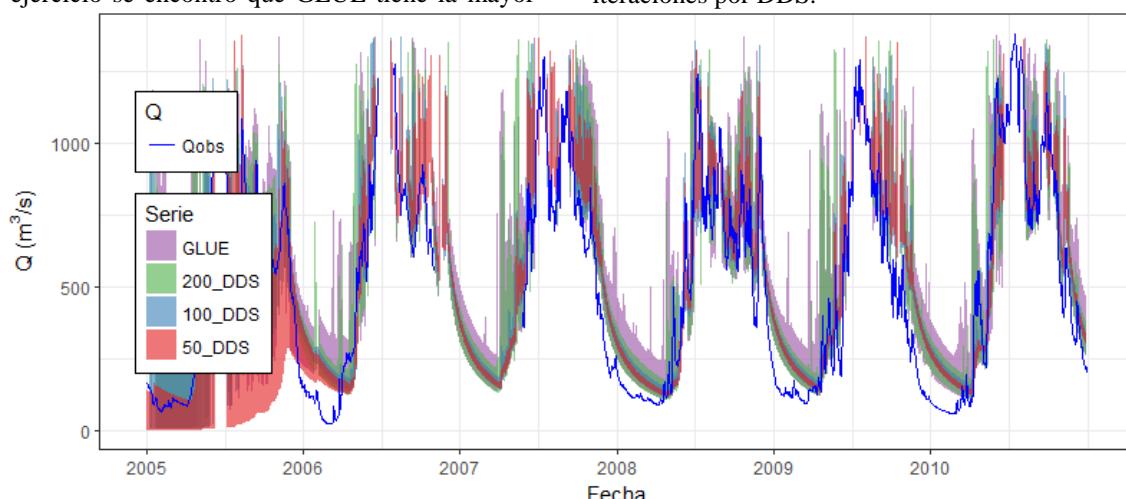


Figura 2. Bandas envolventes de las simulaciones obtenidas con las dos metodologías en conjunto con los caudales observados.

Tener varios conjuntos de parámetros muy cercanos al óptimo de la F.O. no implica que se obtengan más observaciones dentro de las bandas envolventes. Asimismo, tener anchos de bandas muy amplios puede implicar una mayor desviación del promedio del conjunto de simulaciones (serie de tiempo promedio que generalmente se usa posterior a una calibración donde se ha tenido en cuenta la equifinalidad del proceso de calibración). En consecuencia, se debe generar un balance entre un muestreo lo suficientemente abundante, que obtenga, de todas formas, resultados con desempeños eficientes.

Análisis en otras cuencas y con otros modelos son necesarios. Esto permitirá conocer más sobre las particularidades del método DDS-AU, de sus ventajas y desventajas, con respecto al muestreo uniforme.

## Agradecimientos

Se quiere agradecer al revisor anónimo por los comentarios que permitieron complementar el manuscrito y a los editores de la revista. Igualmente, al Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH) por sus comentarios sobre la idea de generar un código libre de la metodología DDS-AU.

## Referencias

- Beck, H. E., Van Dijk, A. I. J. M., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D. G., Martens, B., & de Roo, A. (2017). MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 589-615. <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>
- Beven, K., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R., & Freer, J. (1995). TOPMODEL. En V. P. Singh (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology* (pp. 627-668). Highlands Ranch CO, USA: Water Resources Publications.
- Beven, Keith, & Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(May 1991), 279-298. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305>
- Buytaert, W. (2018). topmodel: Implementation of the Hydrological Model TOPMODEL in R. London, UK. Recuperado de <https://cran.r-project.org/web/packages/topmodel/index.html>
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, H. V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031. <https://doi.org/10.1029/91WR02985>
- Duque-Gardeazábal, N., Zamora, D., & Rodríguez, E. (2018). Analysis of the Kernel Bandwidth Influence in the Double Smoothing Merging Algorithm to Improve Rainfall Fields in Poorly Gauged Basins. En 13th International Conference on Hydroinformatics (Vol. 3, pp. 635-626). <https://doi.org/10.29007/2xp6>
- R Core Team. (2017). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de <https://www.r-project.org/>
- Tolson, B. A., & Shoemaker, C. A. (2007). Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, 43(1), 1-16. <https://doi.org/10.1029/2005WR004723>
- Tolson, B. A., & Shoemaker, C. A. (2008). Efficient prediction uncertainty approximation in the calibration of environmental simulation models. *Water Resources Research*, 44(4), 1-19. <https://doi.org/10.1029/2007WR005869>

# Caracterización del tamaño de burbuja en flujos altamente aireados

## *Characterization of the bubble size in highly aerated flows*

(Recepción 28/02/2019; Aceptación 03/07/2019)

Marco F.<sup>1</sup>; García J.T.<sup>1</sup>, Castillo L.G.<sup>1</sup>

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

**Resumen.** La aireación es uno de los procesos clave para estudiar el resalto hidráulico. El artículo se centra en la caracterización del tamaño de burbujas en flujos altamente aireados mediante el análisis de imágenes con el módulo de procesamiento de imágenes de MATLAB. Se desarrolló un algoritmo para el ajuste del contorno de las burbujas con funciones de detección de bordes y el ajuste de elipses a dichos bordes. Los contornos fueron mejorados mediante el análisis de curvatura. A diferencia de estudios previos, esta metodología nos permite obtener tamaños de burbuja en flujos con grandes cantidades de aire.

**Palabras clave.** Aireación; procesamiento de imágenes; tamaño de burbuja.

**Abstract.** Aeration is one of the key processes in the study of hydraulic jumps. This article focuses on the bubble size characterization of a highly aerated flow by using the Image Processing toolbox with MATLAB. An algorithm was developed to adjust the bubbles contour with edge functions followed by ellipse fitting. Contours were improved through curvature analysis. Unlike previous studies, this methodology allows us to obtain bubble sizes in flows with large amounts of air.

**Keywords.** Aeration; bubble size; image processing.

## 1. Introducción

En los flujos de superficie libre que ocurren en estructuras hidráulicas (e.g. vertederos, disipadores de energía, etc) se produce una importante interacción entre las fases agua-aire, que resulta en intercambio de energía, transferencia de vorticidad y difusión de gases. La aireación puede contribuir a la disipación de energía, ayudando a asegurar el funcionamiento de estructuras hidráulicas, como es el caso de los cuencos de disipación de energía.

Por este motivo, para el estudio de las estructuras hidráulicas, es importante caracterizar, no sólo la fase de agua, sino también el movimiento simultáneo de aire en el sistema. La consideración de los efectos del aire arrastrado por el flujo de agua, puede ser esencial para garantizar el correcto y seguro funcionamiento de una estructura hidráulica.

Un flujo altamente aireado es aquel que arrastra una cantidad significativa de aire que se descompone en burbujas, y que se caracteriza por su concentración, su tamaño y su desplazamiento.

Durante las últimas décadas, numerosos investigadores han estudiado la entrada de aire en una masa de agua (Wood, 1991; Chanson, 1996; Ervine, 1998; Cummings y Chanson, 1999), así como el tamaño de burbuja (Gulliver et al., 1990). Actualmente, para el estudio de la aireación y el tamaño de burbuja se pueden utilizar diferentes técnicas como la fibra óptica, la sonda de conductividad o el tratamiento de imágenes. Esta última metodología ha permitido distinguir células en el flujo sanguíneo (Cuevas et al., 2013); partículas y

nanopartículas en el campo industrial (Zafari, 2015) o burbujas en flujos agua-aire (Lin et al, 2008; Al-Lashi y Gunn, 2016; Mohagheghian y Elbing, 2018). Lin et al. (2008) estudiaron el tamaño de burbuja en procesos industriales de flotación, Al-Lashi y Gunn (2016) se centraron en el procesamiento automatizado de imágenes de burbujas presentes en la rotura de las olas y, Mohagheghian y Elbing (2018) estudiaron la caracterización del tamaño de burbuja en una columna de agua con un inyector de aire (flujo poco aireado). A diferencia de estudios previos, donde se han estudiado flujos con baja cantidad de aire, en el presente trabajo se describen una serie de tratamientos desarrollados en imágenes tomadas en un flujo altamente aireado y perteneciente a un resalto hidráulico sumergido, con la finalidad de delimitar el contorno de las burbujas existentes. El hecho de que el flujo sea altamente aireado obliga a que tengan que aplicarse múltiples tratamientos en cadena y de forma iterativa.

## 2. Material y métodos

La infraestructura utilizada se encuentra en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena y cuenta con una infraestructura para analizar la disipación de energía de chorros turbulentos rectangulares de vertido libre (Fig. 1). Está diseñada para analizar caudales entre 10 y 200 l/s, con alturas de vertido entre 2.20 y 3.50 m, y colchones de agua que oscilan desde el impacto directo hasta 1 m. En el resalto sumergido que se forma aguas abajo del punto de impacto se han



realizado fotografías a distintas alturas del fondo y a diferentes distancias del punto de impacto, para obtener una mejor caracterización del tamaño de burbuja. Las fotografías se han llevado a cabo con una cámara réflex y una iluminación suficiente, obteniéndose imágenes con un tamaño de ventana de 0.08x0.08 m. Las imágenes de partida son RGB de 16 bits.



Figura 1. Infraestructura del laboratorio para el estudio de chorros turbulentos y bifásicos.

La existencia de un elevado número de burbujas hace que el contorno de cada una de las burbujas existentes no se encuentre rodeado por agua, lo que dificulta enormemente la definición de sus límites (Figura 2).

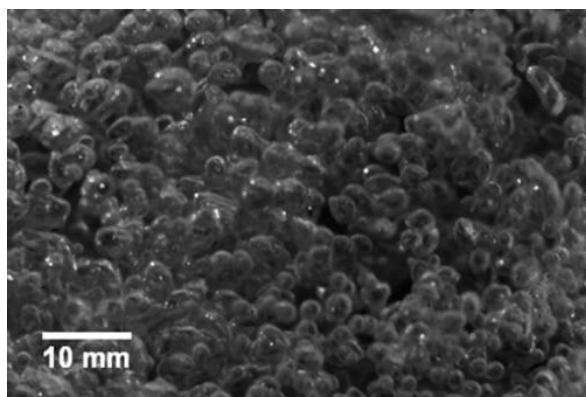


Figura 2. Imagen en escala de grises tomada en una sección longitudinal situada a 0.10 m aguas abajo del punto de impacto y a una altura de 0.20 m desde el fondo del cuenco de disipación (Carrillo et al., 2019).

Procesos de tratamiento de imágenes convencionales, como el uso de un umbral de intensidad para distinguir la diferencia de fases agua-aire, junto con procesos de erosión y dilatado de la fase de aire caracterizada para mejorar el ajuste, no han permitido delimitar las burbujas de manera directa y fiable. Tampoco los procesos de segmentación de la imagen para delimitar la burbuja, han dado resultado, debido a que cada burbuja refleja la luz de manera distinta en su extensión.

Por lo tanto, en el presente trabajo se ha utilizado como primera aproximación al contorno de cada burbuja, una técnica de detección de bordes a partir del gradiente de intensidad entre pixeles. Como resultado de esto, se obtiene una imagen binaria con

múltiples polilíneas que conforman el contorno inicial de las burbujas. A partir de esto, se ha ajustado a cada contorno una elipse y se ha comprobado la bondad del ajuste de la elipse a los puntos de la polilínea. En muchos casos, estas polilíneas no se corresponden con una única burbuja, por lo que el ajuste no se acepta y se opta por investigar dichas polilíneas buscando la existencia de puntos de inflexión, entendidos éstos como límites entre burbujas distintas y donde se introducirá una discontinuidad en la polilínea. Este proceso puede derivar en dos iteraciones en cada polilínea. Una vez que los contornos no poseen puntos de inflexión se procede a ajustar elipses mediante la técnica de mínimos cuadrados a partir de un conjunto dado de puntos, y así poder obtener la representación cónica de una elipse con una posible inclinación (Gal, 2003). Un post proceso semi-automatizado elimina las elipses que quedan en el interior de otras, las que poseen áreas muy similares o cuya propuesta da lugar a un eje menor fuera de rango. Todos estos procesos se han realizado por medio del procesamiento de imágenes de MATLAB.

### 3. Resultados

A continuación se muestran algunos de los resultados obtenidos en el proceso de definición de burbujas en flujos altamente aireados. La Figura 3 muestra dos casos en los que la elipse ajustada con una primera iteración es aceptada. Las Figuras 4 y 5 en su parte izquierda muestran dos casos en los que la polilínea de borde de burbuja no se ajusta a una única elipse en la primera iteración. En la parte derecha de las mismas se observa el resultado final obtenido al cortar las polilíneas por los puntos de inflexión encontrados y el nuevo ajuste de elipses propuesto en las nuevas polilíneas resultantes.

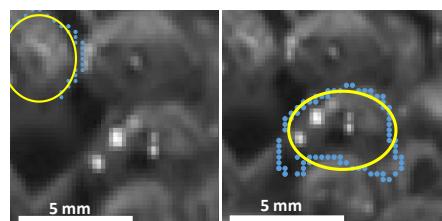


Figura 3. Vista del borde de burbuja junto con la elipse ajustada a dicho borde para dos casos validados en una primera iteración.

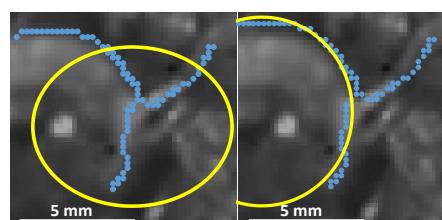


Figura 4. Vista del borde de burbuja junto con elipse propuesta en una primera iteración no validada (izqda.). Elipse propuesta finalmente tras cortar la polilínea en el punto de inflexión detectado (dcha.).

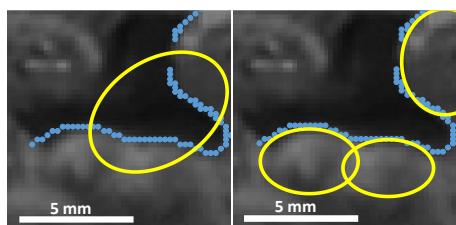


Figura 5. Vista del borde de burbuja junto con ellipse propuesta en una primera iteración no validada (izqda.). Ellipses propuestas finalmente tras cortar la polilínea en los dos puntos de inflexión detectados (dcha.).

La Figura 6 detalla los puntos de inflexión seleccionados para el corte de las polilíneas originales de las Figuras 4 y 5. Estos puntos están ubicados donde se anula la segunda derivada, y de acuerdo a los valores donde se maximiza la primera derivada de cada uno de los contornos analizados.

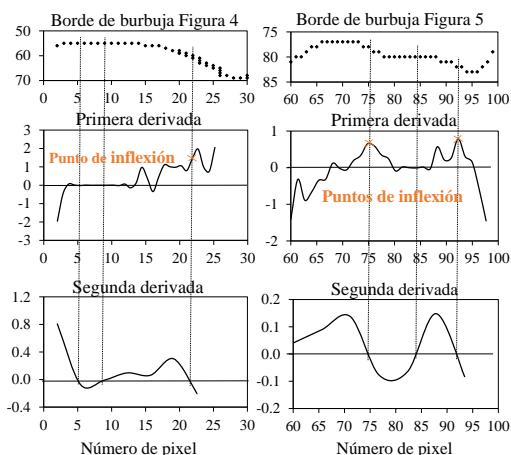


Figura 6. Gráficos de la primera y segunda derivada de la curva de ajuste para los contorno de burbuja analizados en las Figuras 4 y 5.

La Figura 7 muestra el detalle de los ajustes finales obtenidos a partir de la metodología propuesta en una parte de la imagen analizada. Con el procesamiento de imágenes se ha obtenido un tamaño promedio de burbujas de unos 3 mm. Los valores obtenidos se corresponden a los obtenidos con otras técnicas en Carrillo et al. (2018).

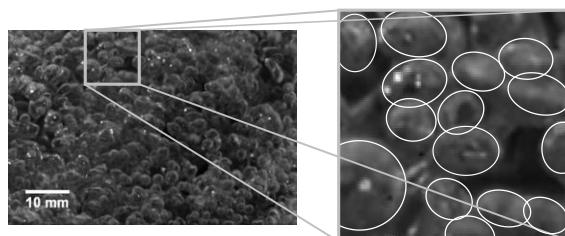


Figura 7. Detalle de las burbujas en una sección longitudinal situada a 0.10 m aguas abajo del punto de impacto y a una altura de 0.20 m desde el fondo del cuenco de disipación y ajuste final obtenido con el análisis de imágenes (Carrillo et al., 2019).

## 4. Conclusiones

En el presente trabajo se han llevado a cabo diferentes procesos de tratamiento de imágenes con el Image Processing toolbox de MATLAB para poder ajustar el contorno de las burbujas existentes en un flujo altamente aireado. Para ello, se han llevado a

cabo funciones de detección de bordes, creación de elipses y depuración mediante el análisis de la primera y la segunda derivada. Los resultados obtenidos en este primer trabajo son considerados aceptables, obteniéndose tamaños de burbuja muy similares a los obtenidos con otras técnicas como es la fibra óptica (Carrillo et al., 2018).

Cabe destacar que el resultado obtenido puede ser mejorado con la aplicación de nuevas funciones para el perfeccionamiento de la forma de la burbuja y la automatización del proceso, en el cuál se está trabajando.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por la ayuda financiera recibida de la beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU), número de referencia FPU16/05658.

## Referencias

- Al-Lashi R. S., Gunn S.R. (2016). "Automated Processing of Oceanic Bubble Images for Measuring Bubble Size Distributions underneath Breaking Waves". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 2016, 33(8):1701-1714.
- Carrillo J. M., Castillo L. G., Marco F., García J. T., (2018). "Experimental and numerical analysis of two-phase flows in plunge pools". 7th International Symposium on Hydraulic Structures, Aachen, Germany.
- Carrillo J. M., Castillo L. G., Marco F., García J. T., (2019). "Experimental and numerical analysis of two-phase flows in plunge pools". *Journal of Hydraulic Engineering*. Manuscript submitted for publication.
- Chanson, H. (1996). "Air bubble entrainment in free-surface turbulent shear flows". Ed: Academic Press. ISBN: 0-12-168110-6.
- Clift, R., Grace, J.R., Weber, M.E. (1978). "Bubbles, drops and particles". Ed: Academic Press. ISBN: 012176950X.
- Cuevas E., Díaz M., Manzanares M., Zaldivar D., Perez-Cisneros M. (2013). "An Improved Computer Vision Method for White Blood Cells Detection". *Journal Computational and Mathematical Methods in Medicine* 2013, 2013:1-14.
- Cummings, P.D. and Chanson, H. (1999). "An experimental study of individual air bubble entrainment at a planar plunging jet". *Journal Chemical Engineering Research and Design* 1999; 77(2):87-169.
- Ervine, D.A. (1998). "Air entrainment in hydraulic structures: A review". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water, Maritime and Energy*, 130(3), pp. 142-153.
- Gal, O. (2003). "Fit ellipse algorithm version 1.0.0.0 (4.19 KB)". [https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3215-fit\\_ellipse](https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3215-fit_ellipse).
- Gulliver J.S., Thene J.R., Rindels A.J. (1990). "Indexing Gas Transfer in Self-Aerated Flows".

Journal of Environmental Engineering; 116(3):503-523.

Lin B., Recke B., Knudsen J.K.H., Jorgensen S.B. (2008). "Bubble size estimation for flotation processes". Journal Minerals Engineering 2008; 21(7):539-548.

Mohagheghian S., Elbing B.R. (2018). "Characterization of Bubble Size Distributions within a Bubble Column". Journal Fluids 2018; 13(3):1-17.

RBI-Instrumentation (2012). ISO Software user's guide.

Wood I.R. (1991). "Air entrainment in free-surface flows". Ed: IAHR. ISBN: 90-6191-994-0.

Zafari S., Eerola T., Sampo J., Kälviäinen H., Haario H. (2015). "Segmentation of Overlapping Elliptical Objects in Silhouette Images". IEEE Transactions on Image Processing, 24(12), pp. 5942-5952.

