

## ANÁLISIS HIDRODINAMICO EN UN CANAL DE DERIVACIÓN: CASO EL CENSO, MUNICIPIO DE CENTRO, TABASCO

### HYDRODYNAMIC ANALYSIS IN A DERIVATION CHANNEL: CASE CENSUS, CENTRO MUNICIPALITY, TABASCO

<sup>1</sup> García-Reyes M., <sup>2</sup>Priego-Hernández G., <sup>3</sup>Soto-Cortes G. y <sup>1\*</sup>Rivera-Trejo F.

<sup>1</sup>División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco, México.

<sup>2</sup>División Académica de Ciencias Básicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco, México.

<sup>3</sup>División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Estado de México, México.

\*Autor de correspondencia: jgfabianrivera@gmail.com

#### RESUMEN

Los canales derivadores son estructuras hidráulicas, que desvían parte del agua que circula sobre un río y la envían hacia una zona de almacenamiento o descarga. Cumple funciones variadas por ejemplo: control de inundaciones, suministro de agua municipal, o con fines consuntivos. Sin embargo, muchas de estas obras son grandes aportadoras de sedimentos, los cuales en la mayoría de los casos no son tomados en cuenta durante su diseño y afectan desde la geometría del canal, hasta las zonas de descarga. Este proceso de transporte de sedimentos va íntimamente ligado con la hidrodinámica del sistema, por lo que, si se quiere cuantificarlo es esencial conocer cómo se desarrollan los campos de velocidad dentro de la geometría del canal derivador.

En este trabajo y como parte de la estimación de la tasa de transporte de sedimentos en una obra derivadora, se presentan: las mediciones de campo y la modelación numérica realizada en una estructura derivadora que actualmente se encuentra en

funcionamiento. El objetivo fue generar la hidrodinámica e identificar los campos de velocidad sobre el río y la estructura derivadora. La importancia radica en la bidimensionalidad del fenómeno y la calibración realizada al modelo numérico.

**PALABRAS CLAVES:** derivaciones; mediciones de campo; equipo Doppler; campos hidrodinámicos.

## **ABSTRACT**

Diversion channels are hydraulic structures which divert part of the water circulating on a river and send it toward a storage or discharge zone. It meets several functions; e.g. control of floods, supply of municipal water or landscape purposes. Nevertheless, many of these works are major generators of sediment which, in most cases, is not considered during the design and affect the channel geometry and even the discharge zones. This sediment transportation process is closely linked to the system hydrodynamics. This is why, if quantification is needed, it is essential to know the development of speed fields within the diversion channel geometry.

As part of the estimation of sediment of the sediment transportation rate in a diversion work, this work presents: field meterings and numeric modeling performed in a diversion structure which is actually in operation. The objective was to generate hydrodynamics and identify speed fields on the river and diversion structure. The importance lies in bidimensionality of the phenomenon and calibration performed on the numeric model.

**Keywords:** derivations, field meterings, Doppler equipment, hydrodynamic fields.

## INTRODUCCIÓN

Los canales derivadores, son obras estructurales fundamentales en los sistemas de riego y en la regulación de caudales. Su diseño consiste en construir una derivación sobre el cauce de un río o canal principal y dirigir parte del caudal transportado hacia otra zona. La derivación empieza a funcionar a partir de un cierto nivel o cota del agua, que va directamente ligado con el caudal descargado.

Las obras derivadoras en ríos de planicie son grandes aportadoras de sedimentos (Allison y Meselhe, 2010). Demas y Curwick (1987) y Dagg *et al.*, (2005) demostraron que la concentración de sedimentos en suspensión está en función de la descarga del flujo, por lo que su cuantificación es esencial para evaluar el impacto que puede ocasionar en las zonas de descarga. El proceso de transporte de sedimentos va ligado con la hidrodinámica del sistema, por lo que si se desea conocer la evolución y distribución de los sedimentos, se necesita conocer cómo se desarrollan los campos de velocidad dentro de la estructura derivadora. Lo ideal para obtener la hidrodinámica es realizar mediciones de campo; sin embargo, debido a la dificultad de medir en un rango amplio de condiciones de descarga, se debe recurrir a alternativas, y es aquí donde la simulación numérica entra en juego.

En este trabajo y como parte de la estimación de la tasa de transporte de sedimentos en una obra derivadora, se presenta la modelación numérica realizada en una

estructura derivadora real. El objetivo fue generar la hidrodinámica e identificar los campos de velocidades sobre el río y la obra derivadora. A partir de esta información se determinaran las zonas o ejes de acarreo de sedimentos en los que se espera se tenga un mayor transporte.

## MODELACIÓN NUMÉRICA

Los modelos numéricos son una herramienta muy útil para el estudio y predicción del funcionamiento de obras hidráulicas (Struiksma *et al.*, 1985). Permiten la evaluación de diferentes escenarios hipotéticos, todo a un costo temporal y económico relativamente bajo. Existen modelos numéricos en una, dos y tres dimensiones (1D, 2D o 3D, respectivamente); sin embargo, cada uno de ellos se aproximan en mayor o menor detalle a los fenómenos físicos en estudio (Oerted, 2015). En la mayor parte de estudios en ríos, debido a la escala espacial, se emplean generalmente modelos 1D en régimen permanente. (Helmiö, 2002; Hammersmark *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2007). No obstante, cuando existen zonas de recirculación y efectos tridimensionales significativos, estos modelos dejan de reproducir adecuadamente el comportamiento físico del sistema. Es aquí cuando los modelos bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) deben ser empleados. Los modelos 2D, consideran a las componentes de la velocidad en la dirección del flujo y transversal, promediadas en la profundidad. Con esto es posible generar con suficiente aproximación el campo de velocidades en planta. Estos resultados se aplican en zonas de inundación en planicies y en ríos donde la relación ancho contra tirante es grande.

Por la forma (bidimensional) en que se distribuye el flujo en una obra derivadora, se eligió simular con un modelo 2D. La implementación de modelos 2D ha dado lugar a diferentes softwares comerciales, algunos de ellos gratuitos (Tabla 1).

**Tabla 1.** Softwares 2D de simulación de flujo de ríos.

<b>Nombre</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Fenómenos que modelan</b>	<b>Entorno que trabajan</b>	<b>Costo</b>
<b>HYDRO_AS</b>	2D	- Flujo hidrodinámico - Transporte de sedimentos - Transporte de contaminantes	Windows	Licencia
<b>MIKE21</b>	2D	- Flujo hidrodinámico - Transporte de sedimentos - Transporte de contaminantes	Windows	Licencia
<b>TELEMAC</b>	1D, 2D y 3D	- Flujo hidrodinámico - Transporte de sedimentos	Windows y Linux	Libre
<b>IBER</b>	2D	- Flujo hidrodinámico - Transporte de sedimentos	Windows	Libre
<b>RIVER 2D</b>	2D	Flujo hidrodinámico Hábitat de peces Evaluación de hielo	Windows	Libre

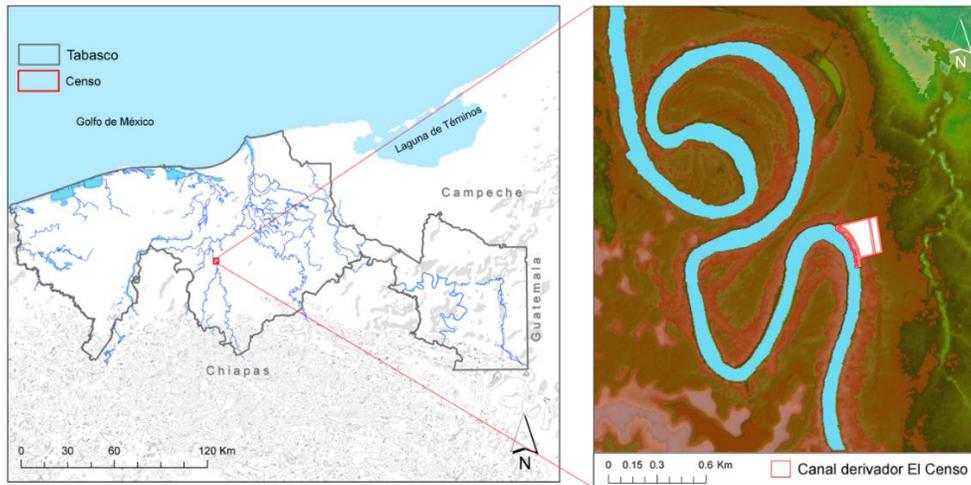
La mayoría de los softwares se fundamentan en la solución de las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como ecuaciones de Saint-

Venant o Shallow Water Equations (SWE), y son los más utilizados en estudios de dinámica fluvial (Ceá *et al.*, 2007; Constantinescu *et al.*, 2012; Ceá y Bladé, 2015).

En este trabajo se eligió el programa IBER 2.4 (Iberaulea.es, 2015), por ser un software gratuito y que ha demostrado un buen desempeño (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2014; Cea y Bladé, 2015; Álvarez *et al.*, 2015) en problemas bidimensionales. El modelo numérico generado, se calibró contra mediciones de velocidad obtenidas en campo y realizadas con un equipo acústico Doppler (ADCP).

## LOCALIZACIÓN

Se analizó el comportamiento hidrodinámico de la obra derivadora “El Censo”, ubicada en el Municipio de Centro, Tabasco (Figura 1). Esta obra se encuentra ubicada en la margen derecha del río La Sierra, en las coordenadas 17.8653° LN y -92.8689° LW y tiene un fácil acceso por carretera. Su función es derivar parte del caudal transportado por el río La Sierra y que se dirige a la ciudad de Villahermosa, Tabasco que es susceptible a sufrir inundaciones. La estructura tiene un gasto de diseño de  $441.00 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , la cota de agua en la que inicia a derivar el canal es la 5.5 msnm y su cota máxima es de 7.3 msnm. Tiene una longitud de 200 m (Figura 2) y ha mostrado evidencia de ser una gran aportadora de sedimentos (Figura 3).



**Figura 1.** Localización del canal derivador, El Censo.



**Figura 2.** Canal derivador El Censo, en la margen derecha del río La Sierra.



**Figura 3.** Sedimentos depositados en la margen derecha del canal derivador, El Censo.

## **METODOLOGÍA**

Se dividió en dos etapas: I, Generación de topografía y medición hidrodinámica; II, Desarrollo de modelo numérico (2D) y simulación de escenarios de escurrimiento.

### **Generación de topografía y medición hidrodinámica.**

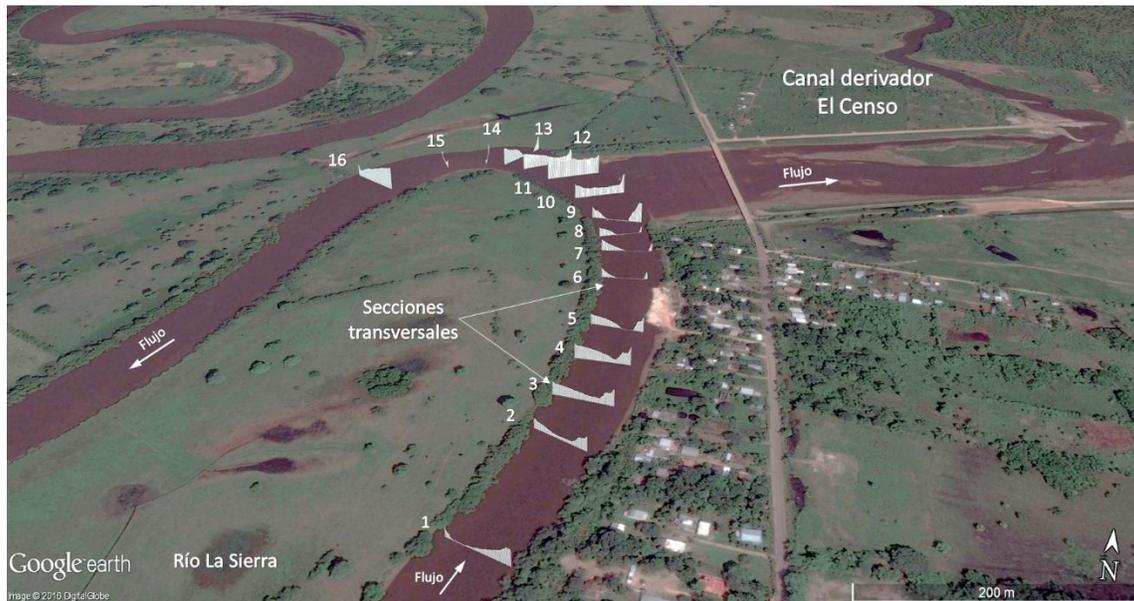
Se recopilaron y depuraron datos topográficos del terreno. Estos se generaron empleando un perfilador acústico Doppler, Modelo RiverRay de la marca Teledyne, que trabaja a una frecuencia de 600 kHz, conectado a un sistema diferencial de posicionamiento global (DGPS) y montado en una embarcación (Figura 4). Se levantaron 16 secciones transversales sobre el río La Sierra, con una separación aproximada de 50 m entre cada una como se muestra en la Figura 5.



Especificaciones	RiverRay
Frecuencia	600 kHz
Ángulo de haz	30°
Rango de operación	0.40 – 60 m
Tamaño de celda	Selección automática*
Blanking	0.25

\* 0.10 m mínimo

**Figura 4.** Equipo Doppler RiverRay.



**Figura 5.** Esquema de secciones transversales sobre canal derivador El Censo.

El procesamiento de los datos batimétricos e hidrodinámicos medidos por el ADCP se hizo con el software Winriver II®, que es el de operación del equipo. Adicionalmente se

creó un archivo de Excel®, donde se clasificaron los datos de la siguiente manera: a) componentes de velocidad del flujo, b) profundidad en la cual se midió cada vector, c) la distancia transversal medida entre cada vector, d) distancia total de la sección transversal y f) posición geográfica de cada vector velocidad. Se desarrolló un algoritmo en una hoja de Excel® donde se realizó el proceso de filtrado de la hidrodinámica, secciones transversales y batimetría. Para el procesamiento y la visualización del campo de velocidades se emplearon los softwares Excel® con Visual Basic® y Tecplot®.

Si bien los perfiladores acústicos permiten medir las velocidades tridimensionales en ríos, para este trabajo sólo se consideraron las velocidades promediadas sobre la vertical, ya que estas permiten visualizar la trayectoria del flujo sobre el río y el canal derivador. Se empleó la gráfica de la magnitud de estas velocidades para calibrar y validar el modelo numérico.

### **Generación de modelo numérico y simulación de escenarios.**

El software Iber, consta de tres módulos de cálculo: a) un módulo hidrodinámico, b) un módulo de turbulencia y c) un módulo de transporte de sedimentos (Iberaula.es, 2015). Trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares. En el caso particular del módulo hidrodinámico empleado, este requirió como datos de frontera a la batimetría; y como condiciones iniciales, al caudal, la rugosidad y la superficie libre del agua. Fue a partir de la batimetría obtenida que se creó la malla donde se genera la triangulación de volúmenes finitos (Figura 6).



**Figura 6.** Mallado no estructurado (triangulación de volúmenes finitos) generado por programa Iber 2.4 del río La Sierra y canal derivador El Censo.

Se simularon dos escenarios: en el primero, se simuló la condición de gasto medida por el ADCP en el río La Sierra; la segunda, fue con el gasto obtenido en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo, que se ubica sobre el río La Sierra, 2.25 km aguas arriba de la estructura derivadora. En la Tabla 2, se resumen estas condiciones.

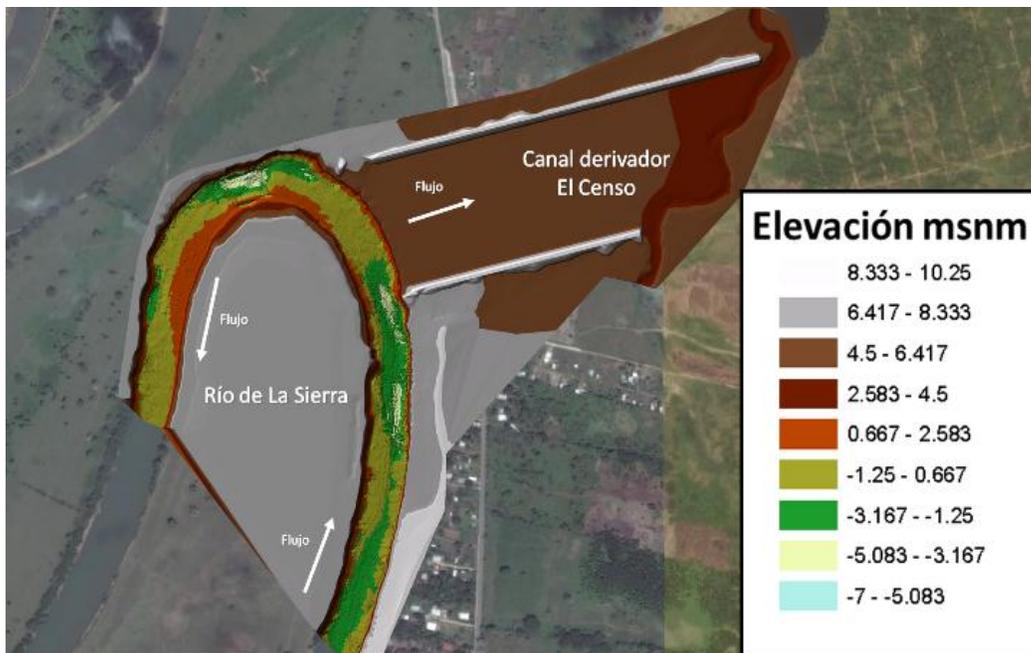
**Tabla 2** Escenarios modelados

Escenario	Caudal $m^3s^{-1}$	Cota del agua (msnm)	n Manning
1	109.00	3.09	0.031
2	501.36	6.17	0.031

## RESULTADOS

### Batimetría.

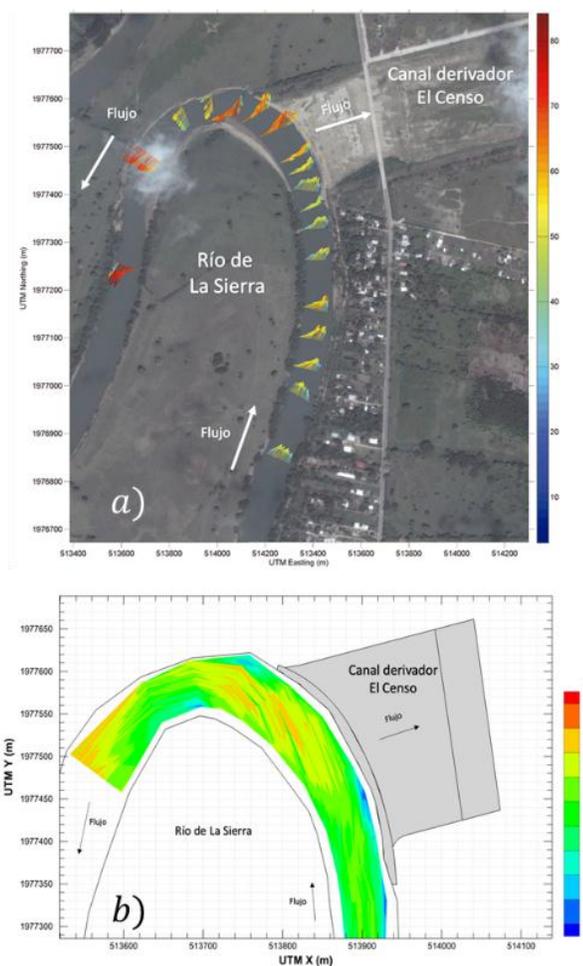
Se construyó un modelo digital de elevaciones (MDE) del relieve del fondo del cauce del río La Sierra y del canal derivador El Censo (Figura 7).



**Figura 7.** Batimetría del río La Sierra y canal derivador, El Censo.

**Hidrodinámica del río La Sierra.**

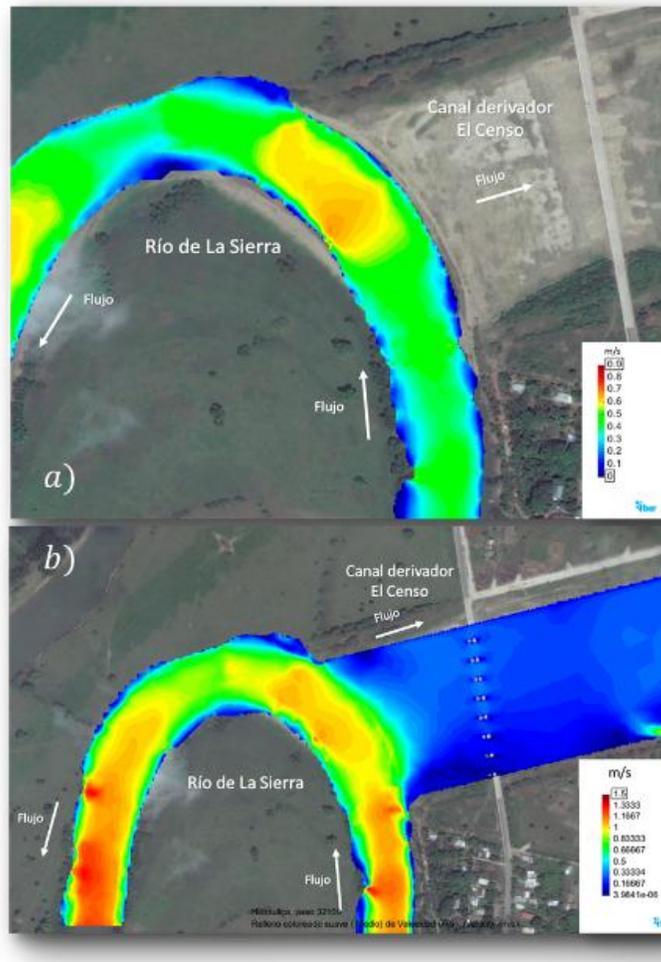
En la Figura 8a se muestran los vectores de la velocidad en planta y en la Figura 8b las magnitudes de las velocidades en planta para las condiciones de caudal medidas por el ADCP. Estos datos se utilizaron para calibrar el modelo numérico generado por el software Iber.



**Figura 8.** a) Vector de velocidad en planta del río La Sierra b) Magnitud de velocidad en planta del río La Sierra.

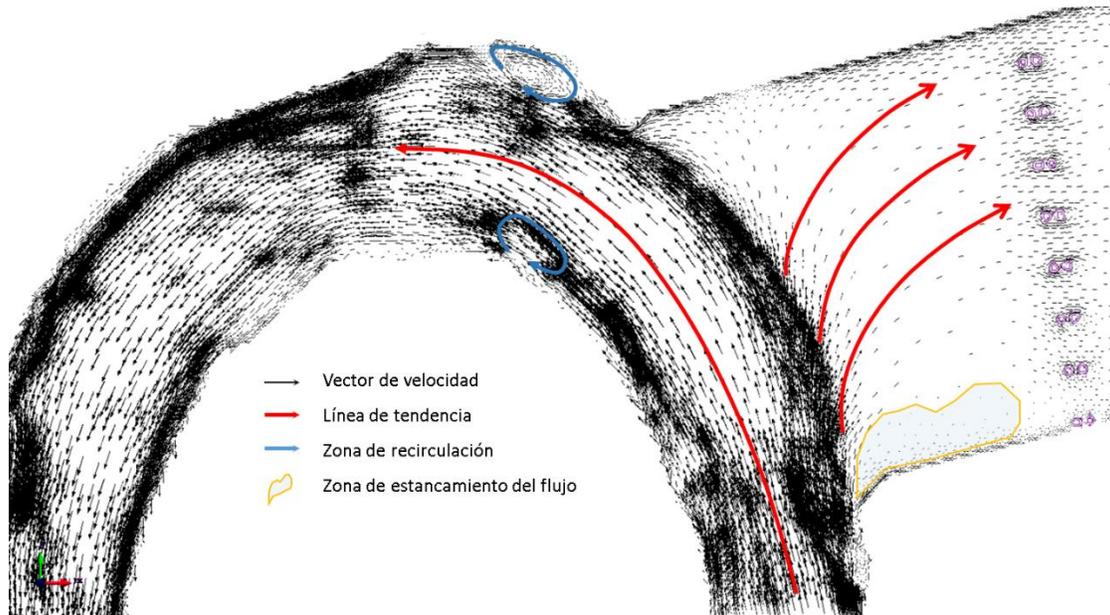
### **Modelación de la hidrodinámica para dos condiciones de gastos.**

Las magnitudes de las velocidades obtenidas por la modelación numérica para los dos escenarios establecidos se muestran en las Figuras 9a y b. El campo vectorial generado por el modelo numérico y las tendencias de las líneas de corriente para la condición donde el canal derivador está vertiendo se muestra en la Figura 10.

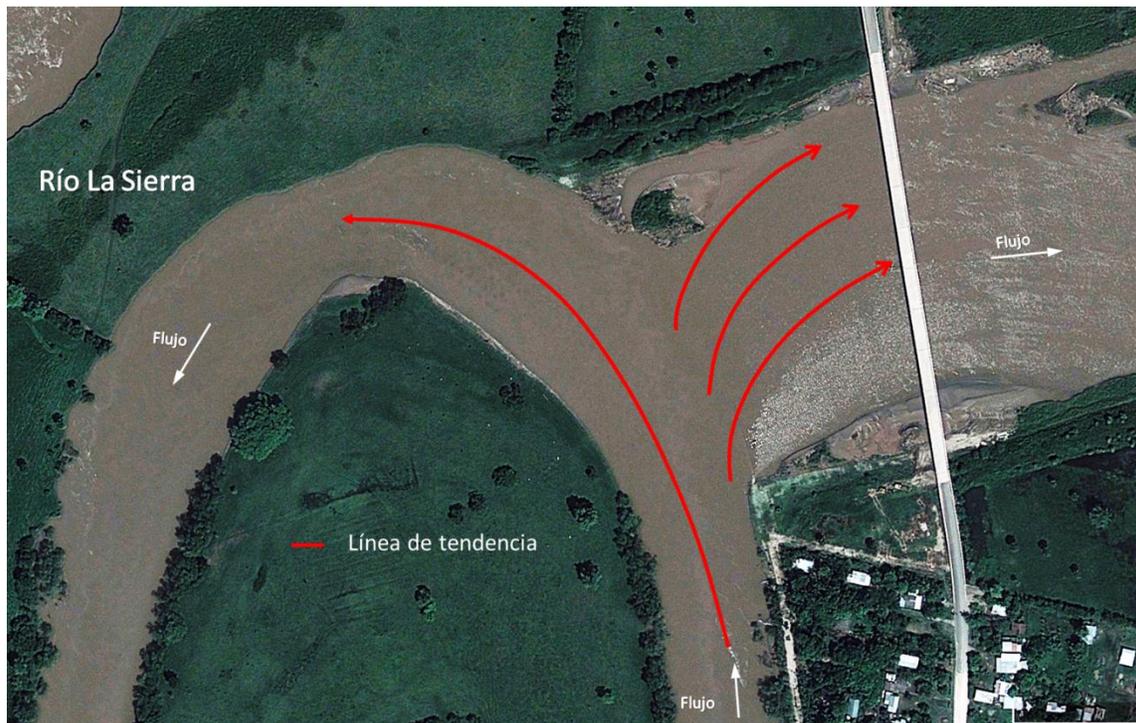


**Figura 9.** a) Modelo numérico del río La sierra en condición de gasto de  $Q = 109.0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

b) Modelo numérico del río La sierra – Canal derivador en condición de gasto de  $Q = 501.36 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .



**Figura 10.** Campo vectorial de velocidad generado por la modelación numérica.



**Figura 11.** Línea de tendencia del flujo en el río La Sierra y el canal derivador El Censo.

## CONCLUSIONES

Se encontró que las velocidades medidas en planta con el ADCP y las generadas con el modelo numérico fueron similares (Figuras 8b y 9a). Las máximas velocidades obtenidas por el equipo acústico oscilan entre  $0.7 \text{ ms}^{-1}$  y  $0.8 \text{ ms}^{-1}$  y las del modelo numéricos muestran velocidades máxima de  $0.6 \text{ ms}^{-1}$  a  $0.7 \text{ ms}^{-1}$  teniendo una diferencia de  $0.1 \text{ ms}^{-1}$ . En el caso de la modelación sobre el canal derivador, se encontró una elevación de 6.30 msnm, que comparada con la medición en campo tiene una diferencia de 0.12 m; es decir, el modelo numérico reproduce con exactitud del 90% la condición medida. Dada la bidimensionalidad y tridimensionalidad de los efectos que se generan en la estructura derivadora, concluimos que el modelo numérico representa adecuadamente el funcionamiento de la estructura. Las líneas de tendencia, marcan los ejes de acarreo de sedimentos. Se observa en las Figuras 10 y 11, una entrada franca al canal derivador por la margen izquierda, con bajas velocidades y zonas de depósito en la margen derecha. Contrastando contra la Figura 2, donde se aprecia una gran cantidad de sedimento depositado sobre la margen derecha, el siguiente paso es medir el transporte de sedimentos y relacionarlo contra las descargas del canal y generar un sedimentograma. Será a partir de este que puede emplearse el módulo de transporte de sedimentos de Iber y calibrarlo contra datos medidos en campo. Una vez logrado esto se estará en condiciones de evaluar la tasa de depósito de sedimentos hacia la zona de descarga.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el Programa de Fomento a Investigación-2015, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco No. UJAT-2015-IA-13.

## REFERENCIAS

Allison, M. A. & Meselhe, E. A. (2010). The use of large water and sediment diversions in the lower Mississippi River (Louisiana) for coastal restoration. *Journal of Hydrology*, 387(3), 346-360.

Álvarez A., Bermúdez J., Cea M., Suárez L., Ures J., & Puertas J. (2015). Modelización de los impactos por DSU en el río Miño (Lugo). *Ingeniería del agua*, 19(2), 105-116. doi:<http://dx.doi.org/10.4995/ia.2015.3648>.

Cea, L. & Bladé, E. (2015). A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resour. Res.*, 51, 1944-7973, 10.1002/2014WR016547.

Cea, L., Puertas, J. & Vázquez-Cendón, M.E. (2007). Depth averaged modelling of turbulent shallow water flow with wet-dry fronts. *Archives of Computational Methods in Engineering*, State of the art reviews, Vol.14 (3).

Constantinescu, G., S. Miyawaki, B. Rhoads, & A. Sukhodolov. (2012). Numerical analysis of the effect of momentum ratio on the dynamics and sediment-entrainment

capacity of coherent flow structures at a stream confluence. *J. Geophys. Res.*, 117, F04028, doi:10.1029/2012JF002452.

Dagg, M., Bianchi, T., Breed, G., Cai, W.-J., Duan, S., Liu, H., McKee, B., Powell, R. & Stewart, C. (2005). Biogeochemical characteristics of the lower Mississippi River. USA during June 2003. *Estuaries* 28, 664–674.

Demas, C.R. & Curwick, P.B. (1987). Suspended-sediment, bottom-material, and associated chemical data from the lower Mississippi River, Louisiana. Basic Records Report #14. USGS, Louisiana Department of Transportation and Development, Baton Rouge, Louisiana, 117 pp.

Hammersmark C.T., Fleenor W.E. & Schladow S.G. (2005). Simulation of flood impact and habitat extent for a tidal freshwater marsh restoration. *Ecol Eng* 25:137–152. doi:10.1016/j.ecoleng. 2005.02.008.

Helmiö, T. (2002). Unsteady 1D flow model of compound channel with vegetated floodplains. *Journal of Hydrology* 269 (1e2), 89-99.

Iberaula.es, (2015). Presentación. [online] Disponible en: <http://iberaula.es/aula-iber/presentacion> [Accesado 3 Sep. 2016].

Oerted M. (2015). Numerical Modeling of free-surface flows in practical applications. Springer, P. Rowinski and A. Radeck-Pawlik, (eds.) Rivers-physical, fluvial and environmental processes, GeoPlanet. DOI 10.1007/978-3-319-17719-9\_8.

Ruiz-Villanueva V., Bladé E., Sánchez-Juny M., Marti-Cardona B., Díez-Herrero E. & Bodoque J. (2014). Two-dimensional numerical modeling of wood transport. *Journal of Hydroinformatics* Sep 2014, 16 (5) 1077-1096; DOI: 10.2166/hydro.2014.026.

Struiksmá N., Olesen W., Flokstra C. & Dr. H. J. De Vriend. (1985). Bed deformation in curved alluvial channels. *Journal of Hydraulic Research*, 23:1, 57-79, DOI:10.1080/00221688509499377.

Wang GT, Yao C, Okoren C. & Chen S. (2006). 4-Point FDF of Muskingum method based on the complete St Venant equations. *J Hydrol (Amst)* 324(1–4):339–349. doi:10.1016/j.jhydrol. 2005.10.010.