

Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctalamochita, Provincia de Córdoba.

Santiago Ochoa^{1,2}, Teresa Reyna², Santiago Reyna², Marcelo García^{2,3}, María Labaque² y José Manuel Díaz³

¹Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECyT), Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

²Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

³Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

Fecha de recepción del manuscrito: 01/09/2015

Fecha de aceptación del manuscrito: 08/06/2016

Fecha de publicación: 30/09/2016

Resumen—La modelación hidráulica de ríos es una herramienta fundamental en el estudio de áreas inundables en épocas de crecidas. En la actualidad, con el empleo de estudios hidrológicos y modelización hidrodinámica en diferentes dimensiones espaciales (1D, 2D y 3D), se pueden manejar hipótesis suficientemente realistas para la prevención de catástrofes y la toma de decisiones ingenieriles correctas para el caso de inundaciones en áreas de riesgo por avenidas en el flujo de un cauce natural. En este trabajo se ejecutó una modelación hidráulica a través del modelo hidrodinámico unidimensional HEC-RAS (Cuerpo de Ingenieros Civiles de la Armada Norteamericana) y el modelo hidrodinámico bidimensional IBER (Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente del Gobierno de España) para delinear posibles zonas de inundación en el río Tercero o río Ctalamochita en su paso por la ciudad de Bell Ville.

Palabras clave—HEC-RAS, IBER, Cuenca Regulada.

Abstract—Hydraulic modeling of rivers is an essential tool in the study of flooding areas in periods of floods. Today, with the use of hydrological and hydrodynamic modeling studies in different spatial dimensions (1D, 2D and 3D), it can be handled sufficiently realistic assumptions for disaster prevention and engineering making right decisions in the event of flooding in areas risk by floods in the flow of a natural channel. This paper presents a hydraulic modeling was carried through the one-dimensional hydrodynamic model HEC-RAS (U.S. Army Corps of Engineers) and two-dimensional hydrodynamic model IBER (Engineering Group Water and Environment of the Government of Spain) to delineate possible areas of flooding in the river Third or Ctalamochita in its middle reach to the height to the city of Bell Ville.

Keywords—HEC-RAS, IBER, Regulated Basin.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones ocurridas en los ríos de la Provincia de Córdoba en el primer trimestre de los años 2014 y 2015 motivaron al estudio del comportamiento de sus principales cauces naturales como es el río Tercero o Ctalamochita. La cuenca del río Tercero abarca un área aproximada de 9500 km² que nace en la zona montañosa conocida como las Sierras Grandes de la Provincia de Córdoba, los principales tributarios del río Tercero en la cuenca alta son los ríos Santa Rosa, Grande y Quillinzo en el sector que contempla los cerros Champaquí y Comechingones (Martínez, 2010). La cuenca alta está regulada por una serie de embalses antes de formarse el río Tercero que pertenecen al sistema de generación eléctrica de la Provincia; desde aguas arriba se menciona el embalse Cerro Pelado, Arroyo Corto, Río Tercero, Ingeniero

Cassaffousth, Ing. Benjamín Reolín y finalmente el de Piedras Moras. A continuación en la Tabla 1 se presentan algunas características de los embalses de la cuenca alta del río Tercero:

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS EMBALSES CONSTRUIDOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO TERCERO. (FUENTE: EMPRESA PROVINCIAL DE ENERGÍA DE CÓRDOBA, 2015)

Embalse	Altura (m)	Espejo de Agua (ha)	Volumen (hm ³)	Potencia Hidroeléctrica Instalada (MW)
Cerro Pelado	104	1240	370	750*
Arroyo Corto	44	357	35	
Río Tercero	50	4600	560	10.5
Ing. Cassaffousth	35	86	10	17.28
Ing. Benjamín Reolín	47	160	13	33
Piedras Moras	57	589	47	6

*Potencia instalada en el complejo Río Grande.

El cauce del río Tercero (Ctalamochita) tiene su nacimiento en el embalse de Piedras Moras y recorre la cuenca que lleva su mismo nombre hasta que vierte sus

Dirección de contacto:

Santiago Ochoa, Gómez Clara 1191, B° Rogelio Martínez X5000HFE, Tel: 3515741821, saog2105@hotmail.com.

aguas en el río Carcarañá recorriendo una longitud aproximada de 300 kilómetros desde el Oeste en sentido al Este. Con un ancho promedio de 35 metros; en las márgenes del río Tercero se localizan importantes centros poblados como Almafuerte, Río Tercero, Villa Ascasubi, Pampayasta, Villa María y Bell Ville, entre otras (Cossavella *et al.*, 2013). En la Fig. 1 se puede ver la ubicación geográfica general del río Tercero:

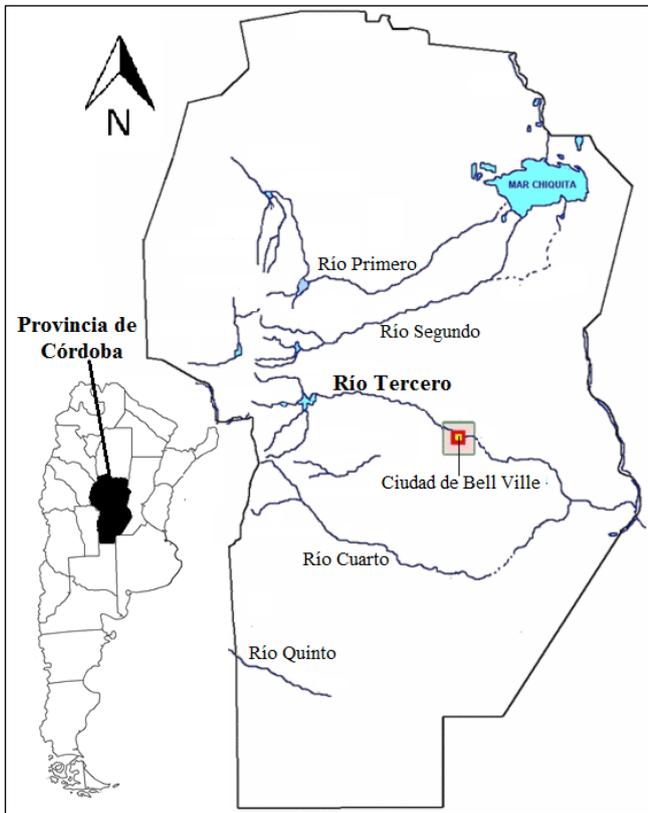


Fig. 1. Ubicación Geográfica del río Tercero.

El sector seleccionado para la modelación hidrodinámica del flujo en lámina libre es el paso del río por la ciudad de Bell Ville. Se eligió este dominio por la importancia y el marcado desarrollo de esta urbe en la zona de estudio, también se tiene datos disponibles de las variables del flujo de aforos realizados en estudios previos para la calibración de los esquemas numéricos desarrollados. La economía de la ciudad de Bell Ville se basa principalmente en la agricultura y ganadería, con una población de 34000 habitantes aproximadamente, la urbe está situada en un lugar estratégico a 200 kilómetros de la ciudad de Córdoba al Oeste y a la misma distancia al Este de la ciudad de Rosario, dos ciudades de gran importancia política y económica de la República Argentina (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010). Como puede observarse en la Fig. 2 el río Tercero en su paso por la ciudad de Bell Ville tiene curvaturas pronunciadas que son características propias de un río de llanura, dándole un trazado meandriforme.

Con respecto a la regulación y manejo de canales y ríos resulta de importancia práctica conocer en forma detallada la hidrodinámica de un flujo en un cauce con meandros ya que permite diseñar sistemas de protección contra la erosión, predecir la topografía estable del lecho en la vecindad de los meandros fluviales, resolver el

posicionamiento de rutas navegables y la ubicación de estructuras hidráulicas, predecir el daño de las crecidas y estimar parámetros de dispersión para ser utilizados luego en estudios de calidad de agua (Tarrab, 2008).



Fig. 2. Imagen satelital del área de estudio correspondiente al río Tercero en su paso por la ciudad de Bell Ville.

La modelización numérica de la hidrodinámica de ríos precisa del uso de la teoría hidráulica del flujo en lámina libre y de los métodos numéricos para resolver las ecuaciones de conservación. Dado que los modelos numéricos son una representación simplificada de la realidad, un aspecto fundamental de los modelos de flujo en ríos es la representación adecuada de la topografía del cauce y llanuras de inundación. Existen herramientas de modelización numérica que permiten realizar simulaciones con una aproximación unidimensional (1D), bidimensional (2D) o tridimensional (3D). En la modelización numérica debería tenderse a incluir explícitamente cada proceso que sea relevante en el prototipo, y los que no sean relevantes no considerarlos. Sin embargo, en la práctica a veces algunos procesos como son efectos de irregularidades en el fondo del cauce del río, vegetación, cambios de pendiente repentinos; entre otros, que sí son relevantes se obvian, y se pretende considerar su efecto a través de un único parámetro como por ejemplo el valor de la rugosidad en la fórmula de Manning (Morvan *et al.*, 2008). En este estudio por la longitud y complejidad del cauce se analizarán y desarrollarán los esquemas hidrodinámicos unidimensional HEC-RAS y bidimensional IBER.

En una modelación unidimensional lo habitual es considerar el río como una línea, con una serie de puntos de cálculo que son las secciones transversales, de manera que la geometría del cauce es una propiedad de cada punto de cálculo o sección.

Por otro lado en una modelación bidimensional el río ya no se discretiza como una línea con una serie de secciones transversales, sino como una malla formada por una serie de celdas poligonales que representan la topografía del cauce y llanuras de inundación. Dicha malla puede ser regular o irregular, estructurada o no estructurada. La mayor flexibilidad para una buena representación de la geometría y contornos se suele conseguir con una malla irregular. Lo habitual es que las mallas estén formadas por triángulos o cuadriláteros (Bladé *et al.*, 2014^a). La experiencia en modelación hidrodinámica de ríos con curvaturas pronunciadas en el eje longitudinal y con una relación de ancho-profundidad pequeña ha mostrado una buena respuesta de los resultados respecto a los datos observados al ser calculados con herramientas hidrodinámicas bidimensionales. Como puede observarse

en la Fig. 2, al tratarse de un río con sectores de alta curvatura longitudinal, la hipótesis de unidimensionalidad adoptada por el HEC-RAS en la solución de las ecuaciones de estado del flujo a superficie libre podría conducir a resultados erróneos; razón para implementar un modelo bidimensional (IBER) a este tipo de flujos esperando una mejor tendencia de los resultados respecto a los datos medidos en campo; lo cual justifica la importancia para contrastar los modelos y revelar eficiencias en el cálculo.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio, utilizando como herramienta de cálculo los esquemas numéricos hidrodinámicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER), es el de representar el comportamiento hidráulico del río Tercero en su paso por la ciudad de Bell Ville que presenta tramos de gran curvatura longitudinal. De este objetivo principal se desprenden los siguientes objetivos complementarios:

- Calibrar los modelos numéricos con datos de campo obtenidos en el dominio de aplicación correspondiente al tramo medio del río Tercero en su paso por la ciudad de Bell Ville.
- Identificar y cuantificar posibles zonas de inundación a través de la implementación de modelos hidrodinámicos unidimensional y bidimensional.
- A partir de los resultados de los modelos hidrodinámicos, se pretende realizar un análisis de las variables relevantes que puedan surgir en la solución de este flujo con lámina libre.

DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

Debido a que los fenómenos en flujos a superficie libre que ocurren en la naturaleza son de una complejidad tal que difícilmente pueden ser resueltos con métodos analíticos exactos; se busca aplicar modelos y simulaciones con la utilización de técnicas experimentales y numéricas que permitan la determinación de las variables que caracterizan el flujo en ríos. El flujo libre se presenta cuando los líquidos fluyen por la acción de la gravedad y solo están parcialmente confinados por un contorno sólido. En la predicción de las variables de flujo para diferentes condiciones tiene gran importancia el desarrollo de modelos y simulaciones numéricas hidrodinámicas con precisión adecuada que permiten la correcta planificación de obras. En este estudio se ha realizado modelación hidrodinámica no estacionaria utilizando los software HEC-RAS (1D) e IBER (2D), a continuación se presentan las ecuaciones de Saint Venant, también se resumen las características de cada uno de los modelos utilizados y al final de este apartado se presenta una breve descripción de los datos de campo necesarios para la calibración de los esquemas numéricos seleccionados.

Ecuaciones de Saint Venant:

Las ecuaciones de Saint Venant se obtienen a partir de las leyes físicas de conservación de la masa y la cantidad de movimiento, junto con la primera y segunda leyes de la termodinámica. De ellas, para un fluido newtoniano e isótropo se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes, que particularizadas para describir las variables promediadas en

un pequeño incremento de tiempo se concretan en las ecuaciones de Reynolds (Bladé, 2005).

Las ecuaciones que describen el régimen variable en lámina libre en una dimensión son las ecuaciones escritas por primera vez por Barré de Saint Venant en 1871, y que sirven para describir tanto el régimen gradualmente variable, como el rápidamente variable. A continuación se presentan estas ecuaciones clásicas en hidráulica que muchas veces son suficientes para representar correctamente el movimiento no permanente en lámina libre en cauces, naturales o artificiales, debido a la marcada unidimensionalidad de estos (Bladé y Gómez, 2006):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA (S_0 - S_f) \tag{2}$$

Donde en las ec. (1) y ec. (2) *t* es la escala de tiempo, *x* la escala del eje longitudinal del río, *A* el área de la sección mojada, *Q* el caudal circulante, *g* la aceleración por la acción de la gravedad de la Tierra, *h* el calado de agua, *S₀* y *S_f* representan la pendiente de fondo y pendiente motriz, respectivamente.

En gran parte de los flujos en lámina libre, y especialmente en problemas de propagación de avenidas en ríos el valor de las variables cambia poco en una misma vertical en las planicies de inundación. Esta consideración permite pensar en una simplificación de las ecuaciones de Reynolds a dos dimensiones mediante un promedio vertical de las ecuaciones tridimensionales. Para poder hacer esta simplificación se consideran las siguientes hipótesis (Bladé y Gómez, 2006):

1. Profundidad del agua pequeña con relación a las otras dimensiones del problema.
2. Distribución hidrostática de presiones en la vertical.
3. Pendiente de solera reducida.

Con esta integración de las ecuaciones de Reynolds en la profundidad, se obtienen las ecuaciones bidimensionales del flujo en lámina libre o ecuaciones de Saint Venant bidimensionales:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+z_0)}{\partial x} - \frac{\tau_{0x} + \tau_{sx}}{\rho} + fhv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} \tag{4}$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+z_0)}{\partial y} - \frac{\tau_{0y} + \tau_{sy}}{\rho} + fhu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial x} \tag{5}$$

Donde en las ec. (3), ec. (4) y ec. (5) *t* es la escala de tiempo, *x* y *y* las escalas de longitud en dirección de los ejes en el plano cartesiano, *z* representa la escala de

longitud en el eje vertical perpendicular al plano de referencia xy , u y v las velocidades del flujo en la dirección del plano xy respectivamente y promediadas respecto a la vertical, h es el calado de agua, z_0 es la cota de fondo, g la aceleración por la acción de la gravedad de la tierra, τ_{0x} y τ_{0y} las tensiones de fondo que actúan en la dirección xy del plano de referencia, τ_{sx} y τ_{sy} las tensiones en la superficie que actúan en la dirección xy del plano de referencia, ρ es la densidad del fluido, f el coeficiente de Coriolis que representa las fuerzas centrífugas por la rotación de la tierra; finalmente T_{xx} y T_{xy} son los términos del tensor de esfuerzos turbulentos de Reynolds, que se resuelven con un modelo de cierre que puede ser de cero, una y dos ecuaciones; dependiendo del número de ecuaciones diferenciales usadas en estimar las viscosidad de los vórtices (García y Niño; 2003).

Modelo Hidrodinámico Unidimensional HEC-RAS:

HEC-RAS 4.1.0 (River Analysis System 4.1.0) es un programa cuya principal función es la delineación de planicies de inundación, es decir permite calcular el nivel del agua en cada sección transversal en el tramo de un río o canal artificial (US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, 2010^a).

El procedimiento por el que HEC-RAS resuelve las ecuaciones de flujo unidimensional no estacionario es el esquema implícito de diferencias finitas de cuatro puntos o esquema de Preissmann. En este esquema, las derivadas respecto al espacio y las variables son evaluadas en el interior de un punto $(n+\theta) \Delta t$. Así las variables en $(n+1) \Delta t$ entran en todos los términos en las ecuaciones. Para cada tramo de río (en medio de dos secciones transversales), resulta un sistema de ecuaciones simultáneas. La solución simultánea es un aspecto importante en este esquema, esto permite que la información del tramo entero tenga influencia en la solución de cualquier otro punto del río (US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, 2010^b).

Por lo tanto, aplicando el esquema de Preissmann a las ecuaciones de Saint Venant para un tramo de cauce dividido en n secciones, en cada una de las cuales hay dos incógnitas (caudal Q y calado h), se obtienen $2(n-1)$ ecuaciones. Se requieren por lo tanto otras dos ecuaciones, una en el extremo aguas arriba del tramo y otra en el extremo aguas abajo, para poder resolver el sistema. Estas dos ecuaciones pueden ser o bien las condiciones de contorno (caudal o hidrograma de entrada, nivel dado de la superficie del agua, entre otras), o en caso de nodos donde confluyen tres canales, la ecuación de conservación de la energía (Cuervo, 2012).

Modelo Hidrodinámico Bidimensional IBER:

IBER es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. En el módulo hidrodinámico se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa (ec. 3) y de momento en las dos direcciones horizontales (ec. 4 y ec. 5).

Las ecuaciones hidrodinámicas se resuelven en forma integral por el método de volúmenes finitos. Para resolver una ecuación diferencial por el método de volúmenes finitos es necesario realizar previamente una discretización espacial del dominio a estudiar. Para ello se divide el

dominio de estudio en celdas de tamaño relativamente pequeño (malla de cálculo). IBER trabaja con mallas no estructuradas formadas por elementos que pueden tener 3 o 4 lados. Se pueden combinar elementos irregulares de 3 y 4 lados dentro de la misma malla (Bladé et al., 2014^b).

METODOLOGÍA:

Es de importancia para la modelación hidrodinámica de un cauce natural obtener la batimetría detallada de la zona, la misma que fue obtenida de estudios previos (Díaz Lozada, 2014); y afinada en campañas de recolección de puntos topográficos en las que se mejoró la resolución de las secciones en el dominio de interés. Teniendo un modelo digital de terreno se procedió a obtener condiciones de contorno hidráulicas a través de las mediciones en campo realizadas gracias a los esfuerzos conjuntos de las instituciones CETA (Centro de Estudios y Tecnología del Agua) de la Universidad Nacional de Córdoba, CIFASIS (Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas) del Centro Científico Tecnológico de Rosario y la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba (Díaz Lozada et al., 2015). Con datos de batimetría e hidráulicos se procedió a ensamblar los modelos. En el caso de HEC-RAS se utilizó la plataforma HEC-GEORAS para importar secciones a partir del modelo digital del terreno creado previamente. Y en el caso del modelo bidimensional IBER, se realizó un mado no estructurado de elementos prismáticos a partir de la triangulación del modelo digital del terreno, resultando una malla de 166148 elementos. Para los dos casos el hidrograma de entrada generado en la sección del dique de Bell Ville monitoreada en el primer trimestre de 2014 y correlacionada con los datos medidos en la sección de calibración del puente Sturla (Díaz Lozada, 2014). Las condiciones de flujo mixto fueron relacionadas con la pendiente normal del fondo del cauce y al final del tramo la relación del caudal con el tirante normal obtenido del cálculo de flujo estacionario para cada uno de los caudales de la serie no estacionaria. Se realizó la modelación hidrodinámica en los dos modelos, calibrando el factor de resistencia al flujo de las paredes y fondo del cauce con los datos de campo y con las condiciones de entrada y salida generadas.

MATERIALES

Los datos para la calibración coinciden con las crecidas extraordinarias ocurridas en el mes de Marzo de 2014 que produjeron cuantiosos daños a la propiedad pública y privada; y cientos de evacuados. La serie de datos que relacionan el caudal medio instantáneo (caudal promediado en la sección transversal medido en un instante de tiempo) medido en la sección correspondiente al Puente Sturla con un instrumento Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés) y validados con niveles obtenidos en una sección conocida correspondiente a un pequeño dique en el sector aguas arriba del tramo del río (Díaz Lozada, 2014), la serie inicia en Febrero de 2014; el flujo base es de alrededor de $15 \text{ m}^3/\text{seg}$ y alcanza su pico el 4 y 5 de Marzo de 2014 con un caudal aproximado de $255 \text{ m}^3/\text{seg}$. A continuación en la Fig. 3 se presentan los hidrogramas de crecidas de donde se obtuvieron los datos

medidos en el sector del Puente Sturla del río Tercero para la calibración de los modelos hidrodinámicos:

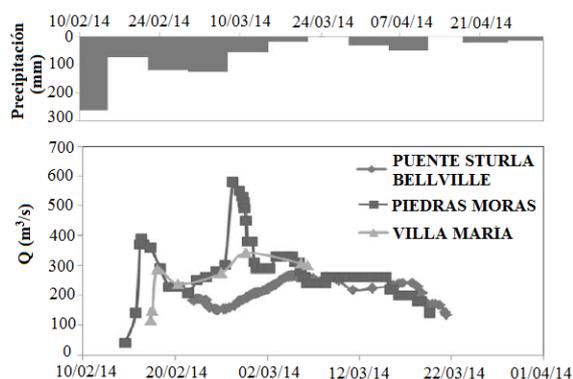


Fig. 3. Hidrogramas de crecida del Río Tercero (Ctalamochita) en Piedras Moras, Villa María y Bell Ville. En la parte superior se representa el hietograma medio areal en la cuenca alta (Díaz Lozada et al., 2015).

Antes del proceso de calibración en cada uno de los modelos seleccionados, se analizó la sensibilidad de los parámetros en la formulación de los esquemas numéricos considerados, y se observó a través del análisis de sensibilidad que en los dos modelos la variable de resistencia al flujo es determinante en los resultados; para la selección de este coeficiente de resistencia al flujo se deben conocer los factores que ejercen mayor influencia como lo son la rugosidad superficial o de la pared del revestimiento, la presencia de vegetación, la irregularidad de la sección, la alineación del canal en planta, la sedimentación o socavación, obstrucciones, el tamaño y forma del canal, el tirante y caudal, el material en suspensión y la carga de fondo (Chow, 1994). El coeficiente de rugosidad definido es el de la variable “n” de la fórmula de Manning con los valores correspondientes de 0.05 en el cauce y 0.12 en las riberas del río.

También se observó que una correcta descripción del terreno es preponderante para la estabilidad del cálculo del flujo no estacionario. Para los dos casos se usó un Modelo Digital de Terreno (MDT) con celdas que representan la batimetría cada 0.5 metros de altura, de donde para el modelo unidimensional HEC-RAS se interpolaron secciones cada 25 metros a través de los casi 9 kilómetros que tiene este tramo del río; mientras que, para el modelo bidimensional IBER se construyó una malla con elementos no estructurados que representa con el mejor detalle la topografía de la zona estudiada. A continuación en la Fig. 4 se presenta el Modelo Digital del Terreno que se construyó para representar la batimetría del río, donde se muestra la sección de calibración ubicada en el Puente Sturla:

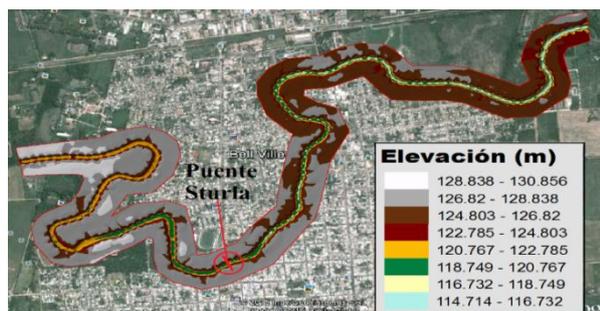


Fig. 4. Modelo Digital del Terreno para representar la batimetría del río Tercero en su paso por la ciudad de Bell Ville.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se tomaron en cuenta las condiciones de contorno dadas aguas arriba por la pendiente normal del flujo y aguas abajo la relación del caudal con el tirante normal del flujo. A continuación, en la Fig. 5 se presentan los resultados del Calado en función al paso tiempo en la sección del dique Bell Ville.

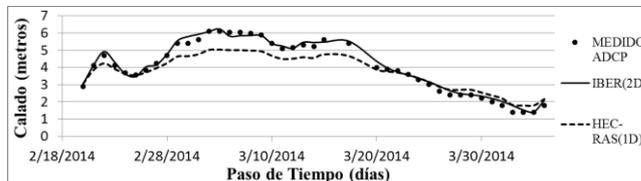


Fig. 5. Resultados de calado de agua en la sección del dique Bell Ville obtenidos en campo y en los modelos numéricos unidimensional HEC-RAS y bidimensional IBER.

El mejor ajuste de los resultados de los modelos hidrodinámicos frente a los datos obtenidos en las mediciones en campo mediante ADCP es el que se obtuvo al utilizar un coeficiente de resistencia al flujo “n” de Manning correspondiente a 0.05 en el cauce y 0.12 en las riberas del río. Estos coeficientes de resistencia al flujo representan, según la literatura (Chow, 1994), un cauce meandriforme con vegetación y en las riberas representa la alta resistencia al flujo que ejerce el suelo por la cantidad de obstáculos debidos a la densidad de vegetación que se encuentra en esta zona del río.

Como puede verse en la Fig. 5, para este escenario, las características del flujo que se obtienen con un modelo bidimensional (IBER) tendrán un mejor ajuste respecto a los datos obtenidos en las campañas de medición del río. Esto se puede explicar por la forma del cauce en este tramo con zonas de elevada curvatura que serán motivo de corrientes de flujo secundarias o velocidades transversales, las mismas que no podrán ser analizadas por esquemas hidrodinámicos unidimensionales (HEC-RAS). La diferencia en los resultados obtenidos en HEC-RAS respecto a la serie de datos de campo crece cuando son mayores los caudales de entrada, siendo de 1.10 metros en los caudales pico de la serie; mientras que los errores del modelo IBER no son sistemáticos con una buena tendencia respecto la serie de datos medidos, siendo la mayor diferencia menor a 0.40 metros y con un error promedio menor al 5% frente al 12% obtenido al ser calculado con HEC-RAS. En la Fig. 6 se pueden observar algunos de los campos de velocidad media instantánea obtenida mediante el modulo hidrodinámico bidimensional IBER.

Como puede observarse en la Fig. 6 se ha esquematizado la velocidad media instantánea en el plano para caudales de 196 m³/seg, 225 m³/seg, 254 m³/seg y 233 m³/seg que corresponden a los días del 24/02/2014, 4/03/2014, 6/03/2014 y 20/03/2014, respectivamente; aquí se puede ver claramente que de los 9 kilómetros de río analizados, el primer tercio del tramo es el más afectado por las inundaciones, zona que también es la que mayor curvatura presenta. También de la Fig. 6 se puede sustentar que la velocidad promedio instantánea en el plano a lo largo del tramo analizado es menor a 2 m/s, habiendo cambios de régimen de subcrítico a supercrítico y aceleraciones en el flujo en zonas de estructuras y puentes en las que la obstrucción del cauce produce perturbaciones en el flujo y

fenómenos locales de erosión; estos fenómenos por lo general son consecuencia de un cambio brusco de pendiente, de la curvatura o de cambios bruscos en la sección transversal del canal.



Fig. 6. Esquema de áreas coloreadas de la velocidad media en el plano en el río Ctalamochita en su paso por la ciudad de Bell Ville. Izquierda Superior: $Q = 196 \text{ m}^3/\text{seg}$, Derecha Superior: $Q = 225 \text{ m}^3/\text{seg}$, Izquierda Inferior: $Q = 254 \text{ m}^3/\text{seg}$ y Derecha Inferior: $Q = 233 \text{ m}^3/\text{seg}$.

A continuación en la Fig. 7 se presenta un esquema de áreas coloreadas de la altura de agua en el tramo analizado que representa el pico de inundación de la serie considerada:

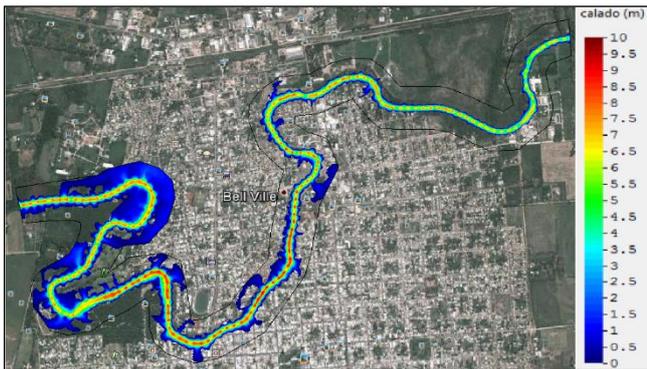


Fig. 7. Esquema de áreas coloreadas de la altura de agua en el río Ctalamochita en su paso por la ciudad de Bell Ville. $Q = 249 \text{ m}^3/\text{seg}$.

En la Fig. 7 se presenta un esquema que representa la mayor inundación según la serie analizada en el modelo hidrodinámico bidimensional IBER, la avenida ocurre el día 10 de Marzo de 2014 con un caudal de $249 \text{ m}^3/\text{seg}$, después de los picos de los días previos de $233 \text{ m}^3/\text{seg}$, $254 \text{ m}^3/\text{seg}$ y $251 \text{ m}^3/\text{seg}$. Puede verse que las zonas más afectadas se ubican en el primer tercio de río, justo en la zona de mayor curvatura, la cota de agua en las zonas inundadas es de alrededor de un metro. En la zona del cauce la altura de agua promedio es de aproximadamente 6 metros alcanzado máximos de casi 10 metros de profundidad en algunos tramos del río. Los resultados obtenidos al utilizar estas herramientas numéricas buscan delinear obras para prevenir inundaciones y entender el comportamiento del río para diferentes eventos.

Si se compararán los resultados de la Fig. 5 con los de la Fig. 7, es evidente que los calados en la primera son mucho menores a los de la segunda; la razón de esto es que en la Fig. 5 el resultado representa el promedio de las velocidades en la sección de calibración del puente Sturla

en los diferentes pasos de tiempo, mientras que en la Fig. 7 se observan los resultados calculados en cada elemento de la malla en un tiempo específico (10/03/2014), por lo que representa el promedio de velocidades en la vertical. En la Fig. 8 se presenta el hidrograma de entrada y los hidrogramas de salida para los modelos estudiados:

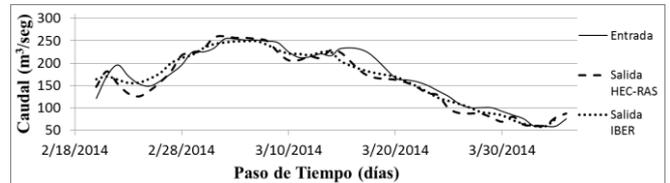


Fig. 8. Hidrogramas de entrada y de salida en los modelos HEC-RAS e IBER implementados en el río Tercero en tramo de Bell Ville.

Como puede observarse en la Fig. 8, el hidrograma de entrada y salida en los modelos de cálculo hidrodinámico HEC-RAS e IBER resulta en un balance de masa con una aproximación adecuada; en IBER se nota mayores diferencias en el balance, aunque la tendencia entre salida y entrada es la misma en los dos casos. Esta mayor diferencia en el balance de masas al implementar la herramienta de cálculo IBER puede explicarse por la robustez en las ecuaciones de masa y cantidad de movimiento resueltas en IBER respecto a las que resuelve el HEC-RAS, en el último la ecuación de conservación de la masa tiene solo una variable de velocidad media longitudinal; mientras que en IBER se resuelven dos componentes de velocidad promediadas en el plano. Esto genera mayor número de iteraciones y por lo tanto acumulación de pequeños errores que se hace notorio en el balance de masa en la salida del modelo, lo que no significa que los resultados de IBER sean erróneos en contraste con la realidad.

CONCLUSIONES

En este estudio se ha presentado el análisis de algunas de las variables en la hidráulica de ríos con el uso de esquemas numéricos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) aplicados al río Tercero o Ctalamochita en su paso por la ciudad de Bell Ville, se ha dado importancia a las variables del flujo en lámina libre sin tomar en cuenta contaminantes y transporte de sedimentos. Se analizó como las variables de la velocidad del río y su profundidad son afectadas por la forma del cauce, observando que con curvaturas pronunciadas se representa de mejor manera la realidad al ser modelado a través de esquemas bidimensionales.

El río Tercero o Ctalamochita constituye un afluente de importancia en la provincia de Córdoba por lo que tiene gran valor entender su comportamiento hidráulico, se observó un mejor ajuste de los resultados del calado de agua al utilizar la herramienta bidimensional IBER con error promedio por debajo del 5%, en contraste a un 15% de error en los resultados calculados a través de HEC-RAS; las diferencias se obtienen al comparar las variables de velocidad y profundidad del flujo calculados en los modelos numéricos con los datos obtenidos en estudios previos medidos en campo a través del instrumento ADCP. También se destaca que la diferencia en los resultados del calado de agua obtenidos en HEC-RAS frente a los medidos en campo crecen sistemáticamente según mayor es el caudal de entrada con un máximo error de 1.10 metros,

mientras que en IBER los errores no son sistemáticos y la mayor diferencia respecto a los datos de campo no llega a 0.40 metros. Este mejor ajuste en la modelación numérica bidimensional en el río Tercero, respecto a la unidimensional, se justifica por la forma del cauce en planta que corresponde a un río de llanura con meandros bien definidos y que confieren corrientes secundarias al cauce.

El comportamiento hidráulico del río Tercero en su paso por la ciudad de Bell Ville a partir de los resultados de los modelos implementados es de un flujo subcrítico, con un número de Froude en el rango de 0.1 a 0.4 para todo el dominio. También se calculó el área inundada en el paso de tiempo con mayor desborde correspondiente al 10/03/2014 (Fig. 7) y fue de aproximadamente de 43 hectáreas con una altura promedio de un metro y correspondiente al 25% del dominio estudiado (este porcentaje se obtiene sin tomar en cuenta el cauce que no se considera como área inundable). La velocidad promedio en todo el dominio calculada a partir de los resultados del modelo HEC-RAS es aproximadamente 1.2 m/seg y a partir de los resultados del modelo IBER aproximadamente 1.26 m/seg, de esto se puede calcular el tiempo de tránsito para los 9 kilómetros de dominio que es aproximadamente 2 horas.

En el proceso de la evaluación de un cauce sería de interés incorporar mejoras en la representación numérica de la variabilidad de la naturaleza, se pueden agregar a las herramientas existentes la simulación de contaminantes y transporte de sedimentos, se puede obtener una mejor representación del Modelo Digital del Terreno (una mejora en la representación del MDT será más costosa por el mayor detalle en la topografía y batimetría) y de las estructuras existentes y sus efectos en el flujo e inclusive analizar las ecuaciones con términos que no fueron tomados en cuenta en esquemas previos. Pero es de mayor importancia tomar en cuenta que estas mejoras en la representación de un fenómeno de lámina libre aumentará el esfuerzo computacional, según los esquemas utilizados, esfuerzos que se derivarán a tiempo y mayor costo del análisis, que deberán ser tomados en cuenta en el momento de decidir cuál será la precisión deseada, importancia del proyecto y a qué resultados se desean llegar. Por ejemplo en este caso de aplicación en el río Tercero, al ser analizado un tramo de 9 kilómetros con caudales de entrada en régimen no permanente durante un mes y medio con un paso de tiempo diario, el tiempo de modelación en el esquema unidimensional HEC-RAS fue de alrededor de 15 minutos mientras en el modelo hidrodinámico bidimensional IBER fue de aproximadamente 1000 veces el tiempo de cálculo que en HEC-RAS.

REFERENCIAS

- [1] Bladé E., (2005), "Modelación del Flujo en Lámina Libre sobre Cauces Naturales. Análisis Integrado con Esquemas de Volúmenes Finitos en una y dos Dimensiones", *Tesis Doctoral, FLUMEN, E.T.S. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, UPC*.
- [2] Bladé E., Cea L., Corestein G., (2014^a), "Modelización Numérica de Inundaciones Fluviales", *Ingeniería del Agua 18.1*, pp: 71-82.
- [3] Bladé E., Cea L., Corestein G., Escolano E., Puertas J., Vázquez-Cendón M. E., Dolz J., Coll A., (2014^b), "IBER: Herramienta de Simulación Numérica en Flujo en Ríos", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol.30 (1) pp.1-10.
- [4] Bladé E., Gómez M., (2006), "Modelación del Flujo en Lámina Libre sobre Cauces Naturales. Análisis Integrado en una y dos Dimensiones", Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, FLUMEN, E.T.S. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, UPC, Barcelona, España.
- [5] Chow V. T., (1994), "Hidráulica de Canales Abiertos", McGraw Hill, Illinois, United States.
- [6] Cossavella A. M., Carranza P. M., Oroná C., Monarde F., Larrosa N., Nadal F., Roque M., Nuño C., Hunziker M. L., Ferreyra M., Brito R., Saldaño V., Melián J., Bresciano J., Diaz A., (2013), "Gestión de Efluentes Líquidos en la Cuenca del río Tercero (Ctalamochita)", *XXIV Congreso Nacional del Agua 2013*.
- [7] Cuervo A. E., (2012), "Comparación de los Modelos Hidráulicos Unidimensional (HEC-RAS) y Bidimensional (IBER) en el análisis de Rompimiento de Presas de Materiales Suelos", *Tesis de Maestría, FLUMEN, E.T.S. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, UPC*.
- [8] Díaz Lozada J. M., (2014), "Cuantificación y Caracterización del Escurrimiento Superficial en el Sistema Fluvial del Río Carcaraña", *Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba*.
- [9] Díaz Lozada J. M., García C. M., Herrero H., Barchiesi G. M., Romagnoli M., Portapila M., López F., Castelló E., Cossavella A., Brarda J. P., (2015), "Cuantificación del Escurrimiento Superficial de la Cuenca del Río Carcaraña", *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba*. Vol. 2, No. 1, pp. 59-72.
- [10] Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC), (2015), "Generación de Centrales Hidroeléctricas", tomado de, <http://www.epec.com.ar/generacion_centrales_h.html>.
- [11] García M., Niño Y., (2003), "Flow and Transport Equations in Surface Waters", *CEE 498 Environmental Hydrodynamics, Spring Sem*.
- [12] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC), (2015), "Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010", tomado de, <<http://www.censo2010.indec.gov.ar/>>.
- [13] Martínez S. J., (2010), "Cuenca del Río Carcaraña", Subsecretaría de Recursos Hídricos de la República Argentina, <http://www.hidricosargentina.gov.ar/documentos/referencias_i8/31.pdf>.
- [14] Morvan H., Knight D., Wright N., Tang X., Crossley A., (2008), "The Concept of Roughness in Fluvial Hydraulics and its Formulation in 1D, 2D and 3D Numerical Simulation Models", *Journal of Hydraulic Research*, 46 (2), pp. 191-208.
- [15] Tarrab L., (2008), "Corrientes Secundarias en Cauces Naturales Inducidas por Curvatura", *Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba*.
- [16] US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, (2010^a), "River Analysis System. User's Manual", Version 4.1.0. California, United States.
- [17] US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, (2010^b), "River Analysis System". Hydraulic Reference Manual, Version 4.1.0. California, United States.