

# MODELO BIDIMENSIONAL DE INUNDACIÓN URBANA DE LA CIUDAD DE AZUL (ARGENTINA) CON HERRAMIENTAS DE USO LIBRE

Guillermo Collazos<sup>1</sup>, Ignacio Villanueva<sup>2</sup>, Georgina Cazenave<sup>1</sup> y Cristian Guevara<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) – C.I.C., Argentina.

<sup>2</sup>Consultor independiente Recursos Hídricos, España.

E-mail: gcollazos.ihlla@gmail.com, ivillamadrid@gmail.com

## Introducción

En la actualidad la simulación de inundaciones con modelos matemáticos para las ecuaciones de Saint Venant, o de aguas poco profundas, tanto en una como en dos dimensiones, cuenta con un gran número de códigos para su ejecución, tanto en el ámbito académico como en el de consultoría profesional, pero no son tantos los códigos robustos y de libre distribución disponibles.

En éste trabajo se ha empleado el software libre IBER v2.4.3 (2018) para modelar el efecto y la extensión de las inundaciones del arroyo del Azul en la planta urbana de la ciudad homónima, ubicada en el centro de la pampa bonaerense (Fig. 1 izq.).

El arroyo atraviesa la ciudad con dirección general Sur-Norte, y se modeló una banda a ambos lados del arroyo marcada con línea gris gruesa, coincidente con la zona afectada por los desbordes (Fig. 1 der.).



Figura 1.- Izq.: ubicación de la ciudad de Azul; Der.: trama urbana, arroyo y cuadrángulo del área modelada.

## Modelo del terreno y rugosidad

Se modela un tramo de aproximadamente 8000 m de curso del arroyo, con una pendiente media de 0,0014; desde el sector periurbano sur al sector periurbano norte.

La elevación del terreno (en los cruces de calles y en otros puntos de interés) y las 20 batimetrías utilizadas se obtuvieron mediante relevamiento con GPS diferencial, datos que fueron adecuadamente procesados y corregidos.

También se relevaron los principales puentes, que se incorporan al modelo de forma simplificada.

Se desarrollaron subrutinas específicas para interpolar las cotas de la parte urbana del dominio, para representar por interpolación la elevación de las calles y veredas de forma realista. Las áreas internas a la línea de edificación se retiraron del modelo para minimizar el número de elementos de cálculo de la malla. Separadamente se reconstruyó parte del cauce mediante interpolaciones de tipo spline cúbico de Hermite (Caviedes-Voullieme et al. 2014).

Por último se unieron ambas partes de la topografía para obtener el modelo completo del terreno, empleando el Sistema de Información Geográfica libre QGIS (2018).

En el trabajo de modelización numérica se presta especial atención a la sensibilidad de los modelos respecto a la batimetría regenerada del cauce, el mallado de la red (Gil et al. 2011) incluyendo la superficie de inundación en suelo urbano, y las posibles topologías de mallado para incluir los diversos puentes y otras estructuras hidráulicas o áreas de flujo dinámico o de almacenamiento en la zona de interés.

El área modelada se zonificó por su rugosidad, aplicando valores típicos a las zonas con arboleda, vegetación corta (césped o pasto cortado), vegetación natural y asfalto/cemento.

## Ecuaciones modelizadas

En la formulación conservativa en dos dimensiones, las ecuaciones en derivadas parciales acopladas, no lineales, en aproximación de aguas poco profundas son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = Q_l \quad [1]$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial x} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad [2]$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} + \frac{\partial huv}{\partial x} + gh \frac{\partial h}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad [3]$$

Siendo  $h$  el calado o tirante,  $(u, v)$  las componentes de la velocidad en el plano  $(X, Y)$ ,  $S_0$  la pendiente del lecho,  $S_f$  la fricción siguiendo la ley de Manning, y  $Q_l$  el aporte puntual de caudal en los puntos fuente o detracción en los sumideros. La ecuación [1] representa la conservación de masa de fluido en cada celda de la malla y la [2] y [3] son las de momento lineal.

La resolución numérica de las anteriores ecuaciones exige métodos numéricos sofisticados capaces de capturar frentes o discontinuidades viajeras (saltos hidráulicos y ondas de avenida o ruptura de presa) sobre cauces inicialmente secos o de topografía muy irregular; Iber (2018) usa resolutores aproximados explícitos para el problema de discontinuidad de Riemann (Toro, 2001) en mallados estructurados y no estructurados de volúmenes finitos.

## Validación, uso y limitaciones del modelo

El modelo construido se validó comparando la superficie alcanzada por el agua en la inundación de 2012, que fue observada en el terreno.

En este modelo no se ha incluido el aporte de caudal por los desagües superficiales y subterráneos de la precipitación caída sobre la ciudad (pluviales), sino sólo el tránsito del agua que trae el arroyo en su ingreso a la ciudad.

También se realiza una comparación de rendimiento de la estación de trabajo empleada para ejecutar el software, para estimar un balance óptimo entre la finura de mallado o precisión, y el tiempo de ejecución según los procesadores disponibles.

Con el modelo hidrodinámico operativo, se realizaron múltiples simulaciones para determinar las zonas críticas de calado y velocidad, así como la evolución temporal de la zona inundada, para ayudar a las actividades de defensa civil.

Este modelo -que abarca todo el sector inundable urbano de la ciudad- constituye una extensión y perfeccionamiento de los desarrollos realizados en 2015 en un pequeño sector de la ciudad.

### Referencias bibliográficas

**Collazos, G.** (2015) "Uso del modelo IBER en un problema de flujo bidimensional", *XXV Congreso Nacional del Agua (Paraná, Argentina)*.

**Daniel Caviedes-Voullieme, Mario Morales-Hernandez, Ibai Lopez-Marijuan, Pilar García-Navarro** (2014). "Reconstruction of 2D river beds by appropriate Interpolation of 1D cross-sectional information for flood simulation". *Environmental Modelling & Software*, 61 (2014) 206-228.

**Gil, C., Villanueva, I. and Godiksen, P.** (2011) "Efectos de la cartografía sobre la modelización hidráulica bidimensional de crecidas" II Jornadas Ingeniería del Agua, Barcelona, Octubre, 2011.

**Eleuterio F. Toro**, (2001). "Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows". Wiley; 1st edition (2001-03-23).

**Iber software:** <http://www.iberaula.es> (Accedida Febrero 2018)

**QGIS software:** <https://qgis.org> (Accedida Febrero 2018)