

## ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE PEQUEÑOS PUENTES URBANOS PARA LA EVALUACIÓN DE SU EFECTO SOBRE LAS INUNDACIONES

Nicolás D. Badano<sup>1,2</sup>, Mariano Re<sup>1,2</sup> y Leandro Kazimierski<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional del Agua, Argentina.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina.  
E-mail: nicolas.d.badano@gmail.com

### Introducción

En el Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA) los eventos de precipitaciones intensas suelen resultar en inundaciones urbanas severas. Estas son especialmente frecuentes en varias zonas peri-urbanas que, a pesar de ser altamente vulnerables a los anegamientos, han sido ocupadas por asentamientos precarios en las últimas décadas sin la implementación de infraestructura apropiada (escaso desarrollo de la red de desagües pluviales, calles de tierra, puentes y cruces de los arroyos precarios, etc.)-

Para la evaluación del riesgo de inundaciones de estas zonas para distintos tipos de precipitación se desarrolló una metodología automática para la implementación de modelos hidrodinámicos basados en el código EPA-SWMM a partir de datos preprocesados a través de un Sistema de Información Geográfico (Ortiz et al., 2017; Re et al., 2018). En estos modelos es necesario incluir el efecto hidráulico de una gran cantidad de pequeños puentes urbanos existentes, que pueden funcionar de manera regular o ser sobrepasados ante eventos de cierta magnitud. A tal efecto se construyó una esquematización y se utilizaron hasta el momento coeficientes obtenidos de la bibliografía, que no necesariamente reflejan el real comportamiento de estos puentes.

En este trabajo se construye un modelo hidrodinámico tridimensional de un puente típico de esta región y se simula el escurrimiento para distintos caudales y condiciones de restitución. Estos resultados se utilizan para refinar la metodología de representación de los puentes en el modelo EPA-SWMM y obtener coeficientes más apropiados. También se estudia cómo se modificarían esos coeficientes por el efecto de acumulación de residuos urbanos, fenómeno también bastante frecuente en las zonas de estudio.

### Implementación del modelo tridimensional

Se realizó una revisión de los pequeños puentes urbanos ubicados sobre el arroyo Dupuy, en la localidad de Laferrere, y se adoptó como representativo el ubicado en la calle Garzón. Este está constituido por un bloque de hormigón monolítico, con dos módulos de sección rectangular que abarcan el ancho total de fondo del canal, muros guía a 45° y un tablero plano, sin cordones laterales ni barandas. El tablero tiene su solera plana ubicada ligeramente por encima del nivel del terreno, con pequeñas rampas de acceso a ambos lados. En la zona del puente, el cauce del arroyo Dupuy tiene sección aproximadamente trapezoidal, con taludes empinados. La planicie, que queda confinada por el frente de las propiedades ubicadas a ambos lados del arroyo, es asimétrica. En la Figura 1 se presenta la geometría y dimensiones del canal y el puente adoptadas para la modelación.

Se construyó una malla no estructurada de base hexaédrica, representando un tramo del cauce que abarca desde 12 m aguas arriba hasta 10 m aguas abajo del puente. La resolución general de la malla fue de 0.05 m en todas las direcciones, con un refinamiento cerca de los contornos sólidos del puente a tamaño de 0.025 m, y el agregado de una capa de dos celdas paralelas a todos los contornos sólidos de dimensiones apropiadas para obtener valores  $y^+$  de entre 30 y 500. Por razones de eficiencia,

el tamaño de celda por encima de la superficie libre fue incrementado a 0.10 m. En la Figura 2 se presenta una vista parcial de la malla en coincidencia con la sección del puente.

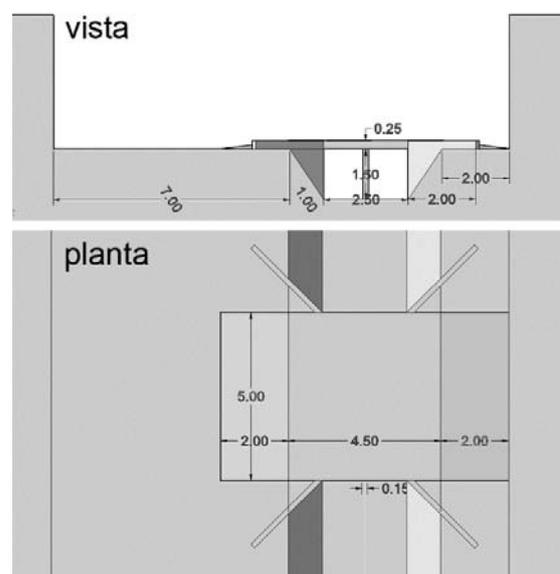


Figura 1.-Geometría y dimensiones del puente tipo.

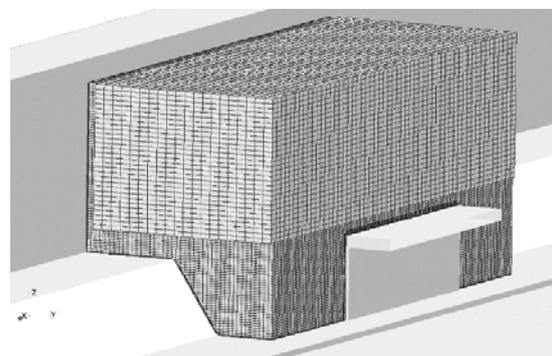


Figura 2.-Vista parcial de la malla de cálculo.

Las ecuaciones de Navier-Stokes con promedio de Reynolds (RANS) se resolvieron utilizando el código computacional de volúmenes finitos *interFoam* de OpenFOAM (Jasak, 1996). Se utilizó como modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST (Menter, 1993), con funciones de pared. Las características de la turbulencia en el borde de entrada fueron estimadas a partir de ecuaciones representativas para flujo libre. Para la discretización de todas las derivadas espaciales se utilizaron esquemas de segundo orden.

### Ensayos en el modelo tridimensional

Se realizaron simulaciones para distintos caudales constantes, entre 1 y 32 m<sup>3</sup>/s. En cada ensayo se fijó un nivel en la condición de borde de aguas abajo calculado de manera de corresponder con el tirante uniforme del canal para distintas pendientes hidráulicas típicas: primero 1 ‰, y luego 5 ‰. La primera de las pendientes se simuló también con una malla

refinada a la mitad de tamaño de celda alrededor del puente, obteniéndose resultados virtualmente idénticos.

Para cada caudal se obtuvieron los niveles de la superficie libre 10m aguas arriba y aguas abajo del puente, partir de los cuales se calcularon las pérdidas de carga. Las curvas resultantes en función del caudal se presentan en la Figura 3. Se observa que las pérdidas de carga son relativamente bajas, menores a 0.10 m en el caso de un pendiente típica de 1 ‰ y menores a 0.20 m en el caso de una pendiente de 5 ‰.

### Esquemmatización en el modelo EPA-SWMM

Para la esquematización de los puentes en el modelo EPA-SWMM se utilizan dos nodos, en los cuales se calcula la carga hidráulica aguas arriba y aguas abajo del puente. Conectando ambos nodos se colocan dos elementos:

- un conducto para representar el flujo bajo el puente.
- un vertedero para representar el flujo por sobre el puente.

Para el puente simulado, la sección del conducto es rectangular, de 2.25 m de ancho y 1.5 m de alto. Dado que el cálculo se realiza a superficie libre o presión de acuerdo a las condiciones, el tirante en el conducto depende del caudal, alcanzando condiciones a sección llena para caudales suficientemente altos. Además de la sección, al conducto se le pueden configurar coeficientes de pérdidas de carga en la entrada y la salida. El manual del modelo (USEPA, 2017) sugiere valores de estos coeficientes: de acuerdo al material del puente, la existencia y/o forma de los muros guía y eventual redondeo de cantos tienen un rango de entre 0.2 y 0.9 para el coeficiente de entrada (FHA, 2005); para el coeficiente de salida el manual sugiere un coeficiente de pérdida de 1.0, que es equivalente a suponer que se pierde toda la energía cinética del escurrimiento.

El manual del EPA-SWMM también sugiere agregar a los conductos un *culvert code* (código de alcantarilla). Este es un valor numérico que caracteriza el patrón de entrada del flujo, basado en la existencia o no de muros guías y la forma de la sección. El código numérico usa este algoritmo para calcular si se produciría o no un control hidráulico en la entrada a la alcantarilla, basado en las ecuaciones empíricas publicadas en el manual de la Federal Highway Administration (2005), de Estados Unidos. Las comparaciones con el modelo tridimensional mostraron que estas ecuaciones predicen incorrectamente la aparición de una sección de control para caudales bajos en el puente estudiado, que no se verifica en el modelo detallado. Se especula que esto se debe a que en el problema de estudio el vano del puente tiene un ancho muy parecido al del canal, por lo que no se producen contracciones. Esta consideración no aparece en las ecuaciones de la FHA; además, dado que dicho manual está pensado para el diseño de puentes y alcantarillas seguros, se supone que presenta criterios conservadores. Para obtener un buen acuerdo entre los resultados de la esquematización en EPA-SWMM y los resultados del modelo detallado se omitió la ecuación de control caracterizada por el *culvert code*.

Los parámetros disponibles para el vertedero que representa el flujo sobre el puente consisten en su nivel de fondo, su ancho y el coeficiente de descarga. Además de especificar un valor para el coeficiente numérico para el coeficiente de descarga, EPA-SWMM permite definir una formulación especial pensada para descarga sobre caminos, pavimentados o de tierra, que toma como único parámetro el ancho de este.

Basándose en los resultados del modelo tridimensional se calibraron los coeficientes del conducto y el vertedero para obtener el mejor acuerdo posible. Los valores obtenidos, que permitieron alcanzar el acuerdo de la Figura 3, se resumen a continuación:

- Coeficiente de pérdida total en el conducto: 0.1
- Nivel de umbral del vertedero: 1.6 m
- Ancho del vertedero: 13.5 m
- Coeficiente de descarga del vertedero: calculado con la formulación para caminos del EPA SWMM, para camino pavimentado de 5 m de ancho.

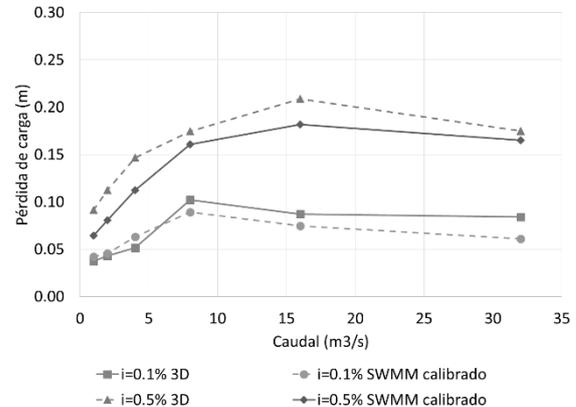


Figura 3.- Pérdidas de carga.

### Conclusiones

La esquematización adoptada para caracterizar hidráulicamente el puente en el modelo EPA-SWMM es capaz de representar de manera relativamente precisa las pérdidas de carga simuladas en el modelo tridimensional. No obstante, el coeficiente de pérdida total (suma de los coeficientes de pérdida a la entrada y a la salida) necesario para obtener un buen acuerdo para caudales bajos es sustancialmente más bajo a los valores recomendados. Esto se debe probablemente a que el puente no impone grandes contracciones al flujo, lo cual es apoyado por los campos de velocidades obtenidos del modelo tridimensional. Para tener en cuenta la existencia de planicies laterales a menor nivel que el tablero del puente el nivel de solera del vertedero en el modelo EPA-SWMM tuvo que definirse a un nivel menor al del tablero real.

Los coeficientes obtenidos hasta el momento consideran el puente en condiciones limpias. No obstante, es habitual en la cuenca encontrar acumulaciones de residuos sólidos en los pequeños puentes durante eventos intensos. Dicha situación, que puede estudiarse con esta misma metodología, seguramente dé lugar a pérdidas de carga más significativas.

### Referencias

- Federal Highway Administration** (2005). *Hydraulic Design of Highway Culverts*. Publication No. FHWA-NHI-01-020.
- Jasak, H.** (1996). *Error Analysis and Estimation for Finite Volume Method with Applications to Fluids Flow*. Tesis de Doctorado, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
- Menter, F. R.** (1993). *Zonal Two Equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows*. AIAA Paper 93-2906.
- Re, M., Kazimierski, L.D., Badano, N.D.** (2018). *High-resolution urban flood model for risk mitigation validated with records collected by the affected community*. Journal of Flood Risk Management (en revision).
- Ortiz, N., Re, M., Kazimierski, L.D., Garcia, P.E.** (2017). *Caracterización de población afectada por diferentes tipos de inundaciones en una cuenca urbana*, XXVI Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2017, Córdoba, Argentina.
- United States Environmental Protection Agency** (2017). *Storm Water Management Model Reference Manual Volume II Hydraulics*. Publication No. EPA/600/R-17/111.