

MODELACIÓN DE INUNDACIONES URBANAS MEDIANTE UN ENFOQUE DIFUSIVO EN MEDIOS POROSOS EQUIVALENTES

URBAN FLOOD MODELING IN EQUIVALENT POROUS MEDIA USING A DIFFUSIVE APPROACH

Víctor H. Cortínez^{a,b,c}, Cecilia I. Stoklas^a y Patricia N. Dominguez^{a,b}

^aUniversidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, Centro de Investigaciones en
Mecánica Teórica y Aplicada (CIMTA), 11 de abril 461, 8000 Bahía Blanca, Argentina,
vcortine@hotmail.com; stoklas@frbb.utn.edu.ar

^bUniversidad Nacional del Sur, Departamento de Ingeniería, Av. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca,
Argentina, pdoming@uns.edu.ar

^cConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnica, CONICET

Palabras clave: Inundaciones urbanas, Modelo difusivo, Medio poroso equivalente, Homogeneización.

Resumen. En este trabajo se propone un enfoque de modelación hidrodinámica difusivo basado en la representación de la ciudad como un medio poroso equivalente, en el cual las edificaciones, muros y otras infraestructuras se consideran en el tensor de permeabilidad y en la porosidad del medio. Se resuelve numéricamente el modelo desarrollado mediante el Método de Elementos Finitos y se comparan los resultados con aquellos obtenidos mediante una modelación detallada del entramado de calles. Se muestra que el enfoque propuesto combina eficiencia computacional y aplicabilidad práctica para el estudio de inundaciones urbanas en grandes dominios.

Keywords: Urban flooding, Diffusion model, Equivalent porous medium, Homogenization

Abstract. This work proposes a diffusive hydrodynamic modeling approach based on representing the city as an equivalent porous medium, in which buildings, walls, and other infrastructures are accounted for in the permeability tensor and the porosity of the medium. The developed model is numerically solved using the Finite Element Method, and the results are compared with those obtained through a detailed modeling of the street network. The findings show that the proposed approach combines computational efficiency and practical applicability for the study of urban flooding in large domains.

1 INTRODUCCIÓN

Las inundaciones urbanas provocadas por lluvias intensas y desbordes fluviales constituyen un riesgo crítico en ciudades densamente construidas, ya que generan cuantiosas pérdidas económicas, dañan infraestructura esencial y ponen en peligro la seguridad de la población. Factores como el cambio climático, la expansión urbana descontrolada y la limitada capacidad de drenaje acentúan esta problemática. En este contexto, comprender cómo se distribuye y evoluciona el flujo de agua en entornos urbanos complejos es fundamental para mejorar la planificación y la gestión del riesgo (Guo et al., 2021).

Los modelos matemáticos constituyen una herramienta clave para simular la hidrodinámica de inundaciones, permitiendo predecir el comportamiento del agua y evaluar medidas de mitigación. No obstante, la modelación en zonas urbanas presenta desafíos particulares debido a la presencia de edificaciones, que inducen trayectorias de flujo altamente complejas y multiescales (Iliadis et al., 2023).

Una aproximación rigurosa se basa en modelos detallados formulados con el método de elementos finitos y las ecuaciones de aguas someras (shallow water equations). Alternativamente, la teoría de ondas difusivas ofrece una formulación algo más simple, aunque suficientemente precisa en numerosos casos (Boni et al., 2019). Ambos enfoques, sin embargo, comparten una limitación: el elevado costo computacional asociado a la necesidad de mallas muy finas para representar de manera adecuada la geometría urbana.

Con el fin de superar estas dificultades, se han propuesto enfoques de simplificación (Petaccia et al., 2010). Entre ellos, destaca el modelo de porosidad, que representa al entorno urbano como un medio poroso. En su versión más simple, este modelo emplea un único parámetro —la relación entre el área de calles y el área total de una celda— para caracterizar simultáneamente la capacidad de almacenamiento y el transporte. De este modo, las ecuaciones resultantes, ya sea en su versión de aguas someras o de ondas difusivas, mantienen la estructura general de las originales.

Pese a su atractivo, este esquema presenta limitaciones. Investigaciones previas han demostrado que la porosidad de almacenamiento y la porosidad de transporte no coinciden necesariamente, lo que dio lugar al desarrollo de modelos de doble porosidad, capaces de mejorar la aproximación a la dinámica real (Chen et al., 2012; Velickovic et al., 2016). Además, la configuración urbana ha mostrado tener importancia en el patrón de flujo (Balaian et al., 2024; Bruwiera et al., 2018). Más recientemente, se han planteado variantes refinadas del concepto de porosidad, obteniéndose resultados prometedores (Ferrari et al., 2020). También se ha propuesto un modelo similar para simular condiciones de viento en ambientes urbanos (Wang et al., 2021). Sin embargo, estos modelos requieren en general procesos de calibración —ya sea mediante ensayos de laboratorio, estudios de campo o comparaciones con simulaciones detalladas—, lo que implica costos adicionales. Además, la mayoría de ellos no incorpora explícitamente la direccionalidad de las arterias, limitando la capacidad de capturar la anisotropía del flujo.

En este trabajo se propone un enfoque alternativo y simplificado para la modelación hidrodinámica urbana, basado en una formulación difusiva homogeneizada que incorpora explícitamente la estructura del entramado urbano. La idea central es considerar que, en áreas densamente urbanizadas, el flujo dentro de las calles es esencialmente unidimensional, mientras que la interacción entre ellas genera un comportamiento efectivo a escala de barrio (o celda).

A partir de una formulación variacional, se deriva una ecuación difusiva anisótropa cuyas conductividades efectivas capturan la geometría y la conectividad del tejido urbano. El modelo resultante es análogo al flujo en un medio poroso anisótropo, lo que permite representar de forma coherente el transporte de agua en entornos urbanos complejos con un costo

computacional muy reducido. Esta idea fue aplicada exitosamente por los autores en el contexto de flujo de tráfico urbano (Cortínez et al., 2024).

Finalmente, el modelo se resuelve numéricamente mediante el método de elementos finitos y se comparan los resultados con aquellos obtenidos a partir de simulaciones detalladas del entramado de calles. Los autores consideran que el enfoque propuesto combina eficiencia computacional y aplicabilidad práctica, constituyendo una herramienta útil para evaluar escenarios de lluvias extremas o fallos en la infraestructura de drenaje en áreas urbanas densas.

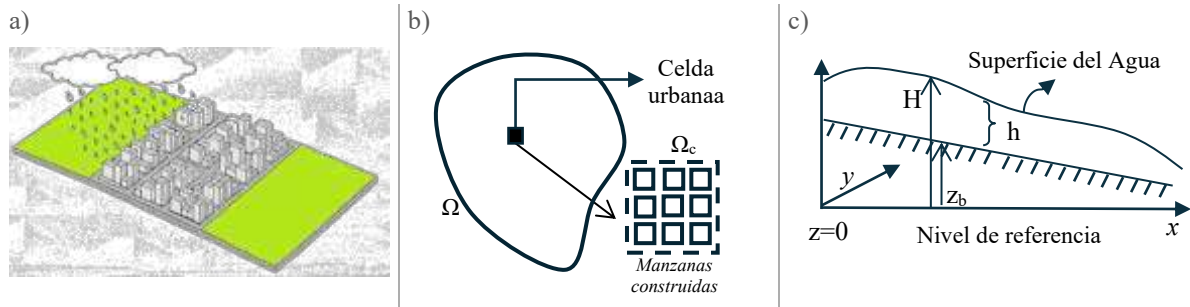


Figura 1: Esquema bajo estudio a) Domino de la ciudad, b) Celda urbana y c) Altimetría del terreno.

2 MODELO DIFUSIVO PARA LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

El modelo difusivo constituye una de las aproximaciones más utilizadas para describir la escorrentía superficial tanto en áreas rurales como urbanas. Se basa en una simplificación de las ecuaciones hidrodinámicas de aguas poco profundas en la que los términos de inercia se consideran despreciables frente a los de gravedad y fricción. Como resultado, se obtiene un esquema matemático de tipo parabólico que, en muchos escenarios prácticos, representa con suficiente precisión la propagación del agua a través de espacios abiertos y calles urbanas, a un costo computacional mucho menor que los modelos hidrodinámicos completos.

La formulación diferencial correspondiente al modelo difusivo, considerando como incógnita principal la carga piezométrica $H(x,y,t)$, está dada por (Boni et al., 2019):

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial H}{\partial y} \right) + P, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} H &= H_D \text{ en } \Gamma_D, \quad \vec{q} \cdot \vec{n} = g_n \text{ en } \Gamma_N, \\ H(x, y, 0) &= H_0(x, y), \end{aligned} \quad (2)$$

donde P representa la diferencia entre las tasas superficiales de precipitación e infiltración, y D es el coeficiente de conductividad hidráulica:

$$D = \frac{h^{5/3}}{n} \left[\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 \right]^{-1/4}, \quad h = H - z_b(x, y), \quad (3a,b)$$

siendo h la profundidad, $z_b(x,y)$ la cota del terreno y n el coeficiente de rugosidad de Manning (ver Figura 1c). El flujo superficial se expresa mediante:

$$q_x = -D \frac{\partial H}{\partial x}, \quad q_y = -D \frac{\partial H}{\partial y}. \quad (4)$$

3 MODELO DIFUSIVO HOMOGENEIZADO PARA LA DINÁMICA DE INUNDACIONES EN AMBIENTES URBANOS

El modelo de difusión hidráulica presentado previamente puede ser resuelto mediante el método de elementos finitos para describir la dinámica de inundaciones en un entramado urbano denso. Sin embargo, el mallado fino necesario para describir el flujo en las calles implica una importante carga computacional. Se desarrolla a continuación una versión homogeneizada del modelo difusivo que considera el ambiente urbano como un medio poroso equivalente. Para ello se considera una celda urbana como se muestra en la [Figura 1b](#), cuyas dimensiones son pequeñas frente a las de la ciudad completa. Luego, es posible formular el modelo difusivo (1, 2) en forma variacional:

$$\sum_i \left[\int_{\Omega_{ci}} \frac{\partial H}{\partial t} v d\Omega + \int_{\Omega_{ci}} D \vec{\nabla} H \cdot \vec{\nabla} v d\Omega - \int_{\Omega_{ci}} P v d\Omega - \int_{\Gamma_{ci}} g_n v d\Gamma \right] = 0, \quad (5)$$

donde Ω_{ci} y Γ_{ci} representan el área y el perímetro de la celda i -ésima, respectivamente, y v es la variación virtual de H . Para avanzar en la homogenización se adoptan las siguientes hipótesis:

a) El flujo en cada cañón urbano es esencialmente unidimensional. Tal suposición es razonable atendiendo que la relación geométrica $b/l \ll 1$ (ancho de calle / largo de cuadra) como se muestra en la [Figura 2](#):

b) Se asume que, a efectos del cálculo de las integrales indicadas en (5), la carga piezométrica H y sus derivadas primeras son constantes en cada celda, considerando sus pequeñas dimensiones frente a las de la ciudad completa.

c) Cada celda se subdivide en tres regiones. ω_1 : área de zonas impermeables (interior de edificios o patios internos, sin contacto directo con las calles) donde no existe escorrentía, ω_2 : área ocupada por calles (con escorrentías unidimensionales) y ω_3 : espacios abiertos (plazas) con escorrentía bidimensional.

Consecuentemente, las integrales indicadas en (5) pueden expresarse aproximadamente de la siguiente manera:

$$\int_{\Omega_c} \frac{\partial H}{\partial t} v d\Omega = \frac{\partial H}{\partial t} v \phi_0 \Omega_c, \quad (6)$$

siendo ϕ_0 la porosidad, definida como:

$$\phi_0 = \frac{\text{Área de las calles} + \text{Área de espacios abiertos}}{\text{Área de la celda}}. \quad (7)$$

Asimismo, para el subdominio correspondiente a las calles (ω_2), el término difusivo se expresa como:

$$\int_{\omega_2} D \vec{\nabla} H \cdot \vec{\nabla} v d\omega_2 = \sum_j \int_{\omega_{sj}} \left(D_s \frac{\partial H}{\partial s} \frac{\partial v}{\partial s} + D \frac{\partial H}{\partial n} \frac{\partial v}{\partial n} \right) b_j ds dn. \quad (8)$$

Considerando que el término subrayado es nulo y que la derivada direccional en la dirección de la calle s_j se define como:

$$\frac{\partial H}{\partial s} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} = \frac{\partial H}{\partial x} \cos \gamma_j + \frac{\partial H}{\partial y} \sin \gamma_j, \quad (9)$$

la integral sobre las calles (8) puede reescribirse como:

$$\int_{\omega_2} D \vec{\nabla} H \cdot \vec{\nabla} v d\omega_2 = \sum_j \frac{D_{s_j} b_j l_j}{\Omega_{ci}} \left[\left(\frac{\partial H}{\partial x} c_j^2 + \frac{\partial H}{\partial y} s_j c_j \right) \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial H}{\partial x} c_j s_j + \frac{\partial H}{\partial y} s_j^2 \right) \frac{\partial v}{\partial y} \right] \Omega_{ci}, \quad (10)$$

donde $c_j = \cos \gamma_j$, $s_j = \sin \gamma_j$ y D_{s_j} es el factor de difusión hidráulica unidimensional en las calles, calculado mediante la formulación de Manning como:

$$D_{s_j} = h \left(\frac{h b_j}{b_j + 2h} \right)^{\frac{2}{3}} / \left(n \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} c_j + \frac{\partial H}{\partial y} s_j \right|} \right). \quad (11)$$

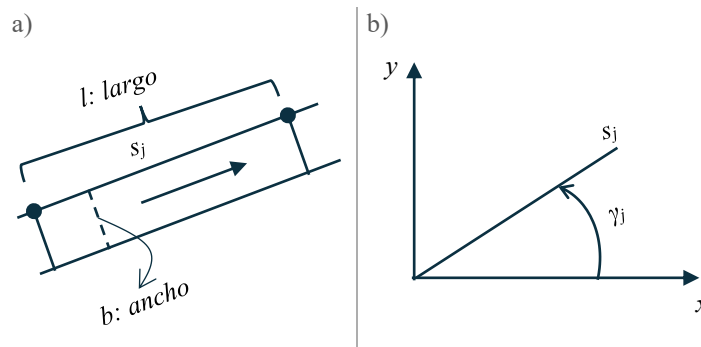


Figura 2: Esquema y sistema de coordenadas locales para una calle.

Por su parte, en el subdominio de espacios abiertos (ω_3), el término difusivo se expresa como:

$$\int_{\omega_3} D \vec{\nabla} H \cdot \vec{\nabla} v d\omega_3 = D \vec{\nabla} H \cdot \vec{\nabla} v \frac{\omega_3}{\Omega_{ci}}. \quad (12)$$

Al sustituir (6), (10) y (12) en la ecuación variacional (5), recuperando la notación integral, teniendo en cuenta que $f_{media} \Omega_{ci} \approx \int_{\Omega_{ci}} f(x, y) d\Omega_{ci}$, y considerando que la suma de las integrales sobre Ω_{ci} corresponde a la integral sobre el dominio entero de la ciudad, Ω , se llega a la siguiente expresión variacional:

$$\int_{\Omega} \phi_0 \frac{\partial H}{\partial t} v d\Omega + \int_{\Omega} \left[\left(R_x \frac{\partial H}{\partial x} + R_{xy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial v}{\partial x} + \left(R_{xy} \frac{\partial H}{\partial x} + R_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial v}{\partial y} \right] d\Omega = \int_{\Omega} P \phi_1 v d\Omega + \int_{\Gamma_N} g_n v d\Gamma \quad (13)$$

donde ϕ_1 puede variar entre ϕ_0 si se asume que la precipitación que cae en los edificios y patios internos se dirige íntegramente al alcantarillado, y 1 si se supone que se conduce hacia las calles. Los coeficientes R_x , R_{xy} y R_y se definen como:

$$R_x = \sum_j \frac{D_{s_j} b_j l_j c_j^2}{\Omega_{ci}} + \frac{D \omega_3}{\Omega_{ci}}, \quad R_{xy} = \sum_j \frac{D_{s_j} b_j l_j c_j s_j}{\Omega_{ci}}, \quad R_y = \sum_j \frac{D_{s_j} b_j l_j s_j^2}{\Omega_{ci}} + \frac{D \omega_3}{\Omega_{ci}}. \quad (14)$$

Finalmente aplicando cálculo variacional a la expresión (13) se llega a la ecuación gobernante:

$$\phi_0 \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(R_x \frac{\partial H}{\partial x} + R_{xy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(R_{xy} \frac{\partial H}{\partial x} + R_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + P \phi_1, \quad (15)$$

que está sujeta a las condiciones de borde e iniciales (2). Aquí el flujo superficial se define mediante las siguientes expresiones:

$$q_x = -\left(R_x \frac{\partial H}{\partial x} + R_{xy} \frac{\partial H}{\partial y}\right), \quad q_y = -\left(R_{xy} \frac{\partial H}{\partial x} + R_y \frac{\partial H}{\partial y}\right). \quad (16)$$

El problema de inundaciones urbanas sobre un dominio continuo bidimensional equivalente Ω , donde la estructura y características de fricción del entramado urbano se codifican en los coeficientes homogeneizados de difusión hidráulica (14), vienen gobernados por la ecuación (15) conjuntamente con las condiciones de borde e iniciales (2).

4 EJEMPLOS NUMERICOS

Se presentan 3 ejemplos representativos resueltos mediante el método de elementos finitos. En todos los casos se utilizó el software [FlexPDE](#), considerando las condiciones geométricas, hidrodinámicas y de borde que se detallan a continuación. Se discuten además los resultados obtenidos en términos de profundidad y caudal, así como los tiempos de cómputo requeridos.

4.1 Ejemplo 1: Flujo incidente sobre un dominio urbano rectangular

Se analiza un dominio de dimensiones $L_x = 5.735$ m y $L_y = 575$ m, que incluye tanto un campo abierto como un sector urbano idealizado compuesto por una grilla de 5 x 10 manzanas en direcciones ortogonales. Cada cuadra presenta una longitud l de 100 m y un ancho de calle equivalente a $0,15 l$. La pendiente del terreno es de 0,05% decreciendo hacia el este. La rugosidad del campo es de $n = 0,050$ s/m^{-1/3}, mientras que para el sector urbano es la del asfalto ($n = 0,015$ s/m^{-1/3}). La porosidad urbana se considera de $\varphi_0 = 0,2$ ($\varphi_1 = 0,2$).

Se tiene en cuenta una precipitación constante de $P = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s, correspondiente a un evento de intensidad “muy fuerte”. En los bordes, se aplican condiciones de profundidad fija, $h = 1$ m en los límites oeste, representando esquemáticamente el desborde de agua de un curso de agua en la zona alta de la ciudad, y $h = 0,2$ m en el este, mientras que en los extremos norte y sur se adoptaron condiciones impermeables.

Los resultados ([Figura 3](#)) muestran la estructura de la grilla urbana, así como la distribución espacial de profundidades obtenida con el modelo detallado.

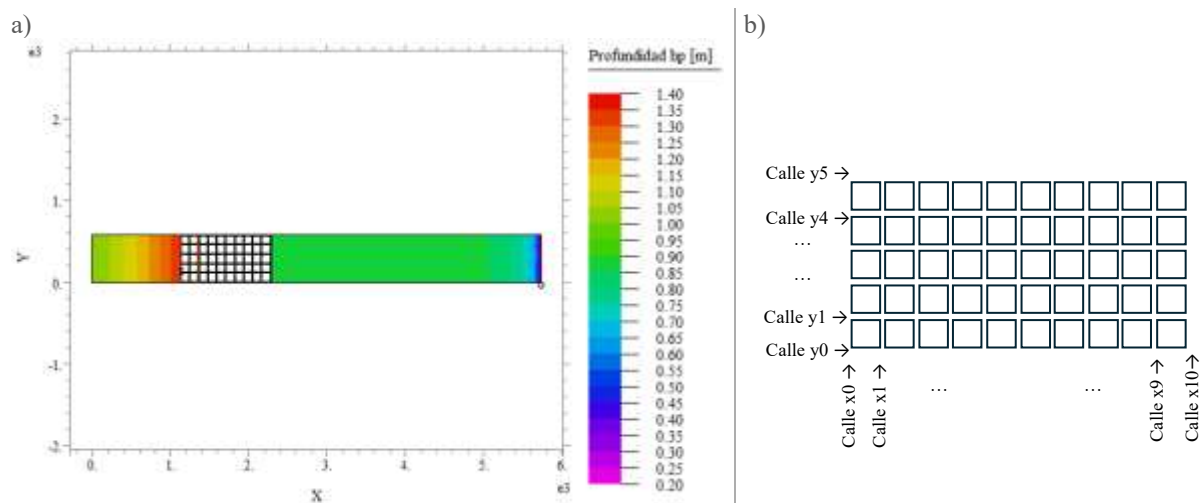


Figura 3: a) Profundidad calculada con modelo detallado y b) Entramado urbano.

La comparación entre los resultados obtenidos mediante el modelo detallado y el

homogeneizado (Figura 4) revela que ambos reproducen adecuadamente el patrón de escurrimiento, con diferencias despreciables tanto para profundidad y caudal circulante en las calles. Este tipo de comparación se repite también para el resto de las calles. El modelo detallado fue realizado con una malla de 13.317 nodos y 5.530 celdas, mientras que el modelo homogeneizado requirió 913 nodos y 412 celdas. Los tiempos de cálculo para ambos modelos fueron de 22 segundos para el modelo detallado y de 1 segundo para el modelo homogeneizado.

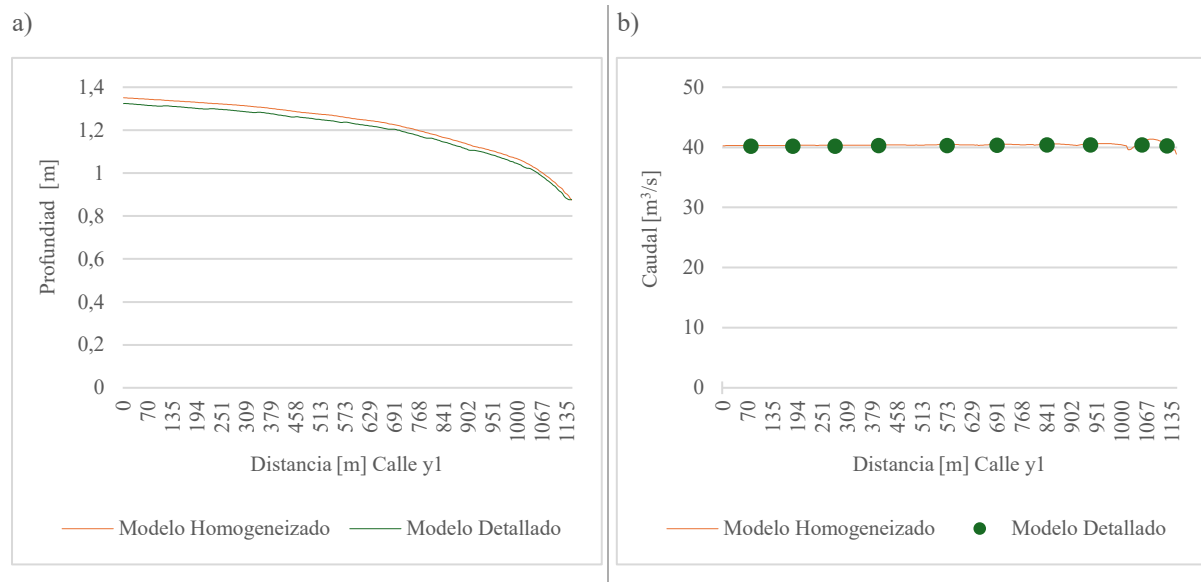


Figura 4: Comparación entre modelo detallado y homogeneizado de a) la profundidad y b) el caudal.

4.2 Ejemplo 2: Flujo incidente en forma oblicua sobre un dominio urbano rectangular

Este caso corresponde a un entramado urbano rotado 45° respecto de los ejes principales del dominio. El área simulada tiene dimensiones $L_x = 5.735$ m y $L_y = 560$ m, con las mismas longitudes y anchos de calles y cuadras que en el ejemplo 1. De igual manera se adopta la misma pendiente del terreno, tasa de precipitación, rugosidades de Manning y porosidad.

La malla correspondiente al modelo detallado (Figura 5) consta de 12.860 nodos y 5.675 celdas.

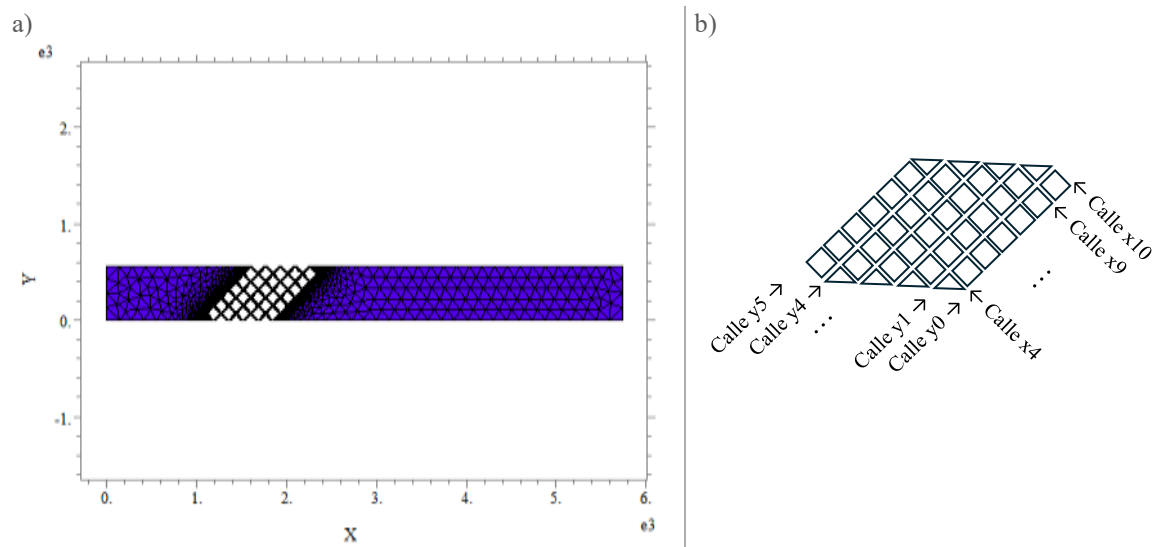


Figura 5: a) Malla dominio del modelo detallado, b) Entramado de la ciudad.

El modelo homogeneizado arroja resultados comparables en términos de profundidades y caudales (Figura 6). La rotación de la grilla urbana genera un desvío en las trayectorias principales de flujo, que es correctamente reproducido por el enfoque homogeneizado.

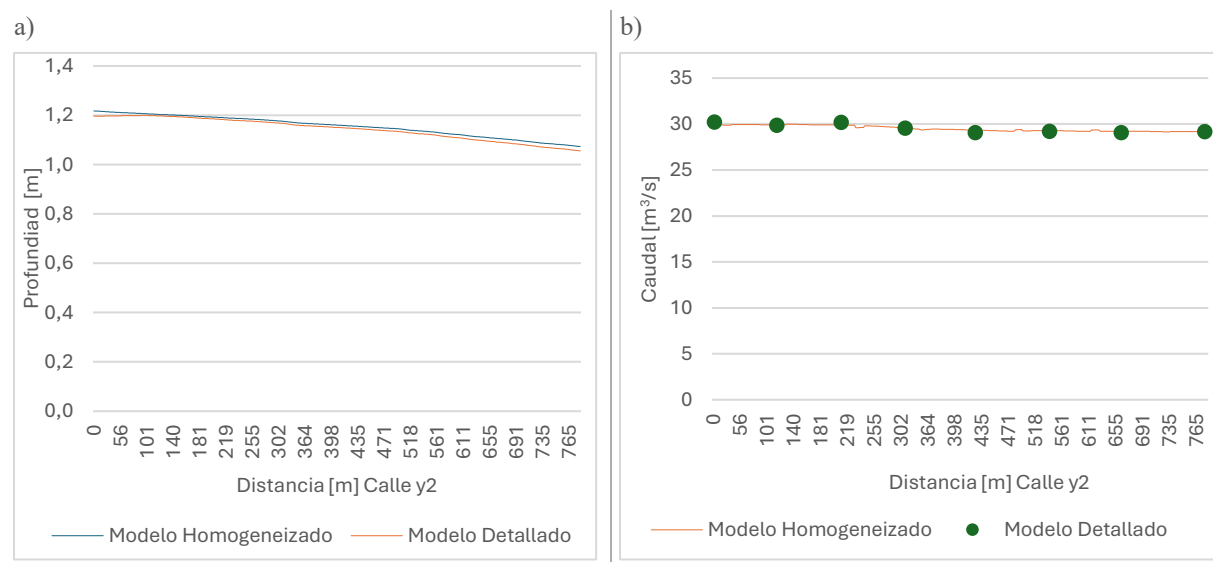


Figura 6: Comparación entre modelo detallado y homogeneizado de a) la profundidad y b) el caudal.

4.3 Ejemplo 3: Simulación de una crecida

En este ejemplo se analiza el comportamiento del sistema urbano ante una onda de crecida transitoria impuesta en el límite oeste del dominio. La condición de borde aguas arriba se define

mediante la función $h(0,t) = h_c \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t-T_{in}}{\sigma}\right)^2\right)$ siendo h_c la altura máxima (0,5 m), T_{in} el

tiempo central donde ocurre el pico del pulso (1.800 s) y σ el ancho temporal del pulso (1.600 s). En este caso no se considera precipitación. En el límite aguas abajo, a diferencia de los ejemplos

previos, se implementa la condición tipo Manning, $q_n = \left| \frac{h^{\frac{5}{3}}}{n} \left(\frac{\partial z_b}{\partial x} \right)^{\frac{1}{2}} \right|$, permitiendo una salida

libre más realista del caudal hacia el extremo este del dominio. El dominio considerado es similar al del ejemplo 1, con una porosidad urbana de $\varphi_0 = 0,2$, $\varphi_1 = 1$ y rugosidades de campo y asfalto de 0,050 y 0,015 s/m^{-1/3} respectivamente.

Como se observa en la Figura 7, el flujo transitorio se propaga a través del entramado urbano, produciendo incrementos de nivel y caudal en las calles. La evolución temporal de la profundidad en distintos puntos de observación muestra un retardo y atenuación progresiva de la onda al avanzar dentro de la ciudad. El modelo homogeneizado reproduce adecuadamente el comportamiento global, con un tiempo de cómputo de aproximado de 5 minutos para una simulación de 10 horas con paso temporal de 36 segundos. El mismo calculo con el modelo detallado, lleva un tiempo de cálculo del orden de 20 horas aproximadamente.

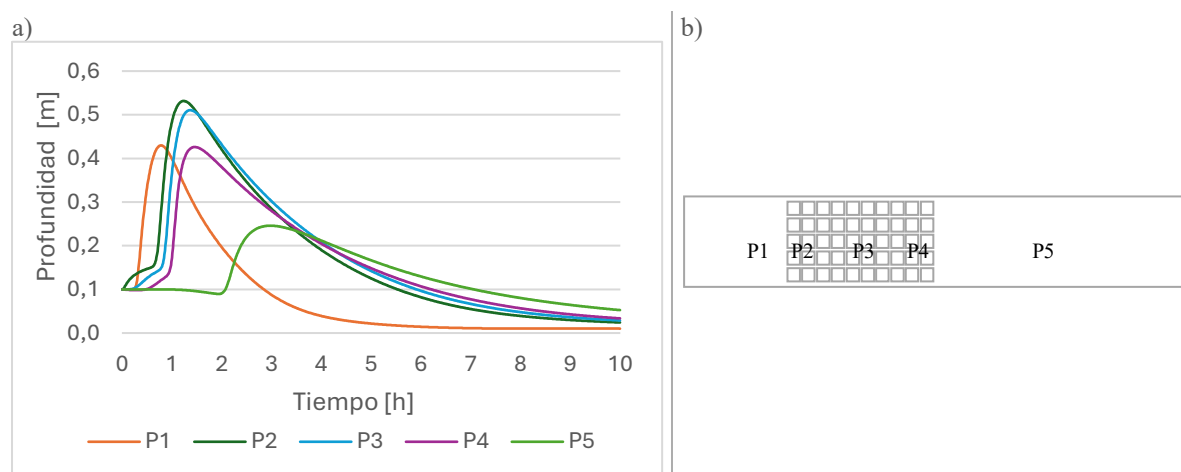


Figura 7: Evolución de la profundidad en 5 puntos del dominio.

5 CONCLUSIONES

Este trabajo presentó un enfoque de modelación de inundaciones urbanas basado en una formulación difusiva homogeneizada, que representa al entramado de calles y edificaciones como un medio poroso equivalente anisótropo. La principal ventaja de este esquema es la reducción significativa del costo computacional frente a la del modelo detallado (con tiempos de cálculo de dos órdenes de magnitud menores), manteniendo al mismo tiempo una adecuada capacidad predictiva de la dinámica hidráulica a escala urbana.

Los ejemplos numéricos confirmaron la validez y robustez del enfoque propuesto.

Los resultados muestran que el enfoque difusivo homogeneizado constituye una herramienta eficiente y confiable para el estudio de inundaciones en dominios urbanos extensos, ofreciendo una alternativa viable para la gestión del riesgo hídrico y la evaluación de escenarios extremos de lluvia o crecidas. En el futuro se extenderá este modelo a efectos de considerar la interacción con el sistema de alcantarillado urbano. Se planea utilizar este enfoque para analizar las condiciones de escorrentía en la ciudad de Bahía Blanca.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento por parte de las instituciones de pertenencia.

REFERENCIAS

- Balaian, S.K., Sanders, B.F. y Abdolhosseini Qomi, M.J., How urban form impacts flooding. *Nature Communications*, 2024. <http://doi.org/10.1038/s41467-024-50347-4>
- Boni, S., Huang, H. y Zhu, W., An urban pluvial flood simulation model based on diffusive wave approximation of shallow water equations. *Hydrology Research*, 50(1):138–154, 2019. <http://doi.org/10.2166/nh.2017.233>
- Bruwiera M., Mustafac A., Aliaga D.G., Archambeau, P., Erpicuma, S., Nishida, G., Zhang, X.W., Piroton, M., Teller, J. y Dewalsa, B., Influence of urban pattern on inundation flow in floodplains of lowland rivers. *Science of the Total Environment*, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.325>
- Chen A.S., Evans B., Djordjević S. y Savić D.A., A coarse-grid approach to representing building blockage effects in 2D urban flood modelling. *Journal of Hydrology*, 426:1–16, 2012.
- Huang C.-J., Hsu M.-H., Teng W.-H. y Wang Y.-H., The impact of building coverage in the metropolitan area on the flow calculation. *Water*, 6:2449–2466, 2014.

<http://doi.org/10.3390/w6082449>

Iliadis C., Glenis V. y Kilsby C., Representing buildings and urban features in hydrodynamic flood models. *Journal of Flood Risk Management*, 2023. <http://doi.org/10.1111/jfr3.12950>

Cortínez V.H., Dominguez P.N. y Stoklas C.I., Modelo continuo anisótropo de tráfico urbano: una formulación evolutiva. *Mecánica Computacional*, XLI:831–840, 2024.

Ferrari A. y Viero D.P., Floodwater pathways in urban areas: a method to compute porosity fields for anisotropic subgrid models in differential form. *Journal of Hydrology*, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125193>

FlexPDE (Versión 7.22) *PDE Solutions Inc. (2020)*. [Software]. www.pdesolutions.com

Guo K., Guan M. y Yu D., Urban surface water flood modelling – a comprehensive review of current models and future challenges. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25:2843–2860, 2021. <http://doi.org/10.5194/hess-25-2843-2021>

Petaccia G., Soares-Fraza S. y Natale L., Simplified versus detailed two-dimensional approaches to transient flow modeling in urban areas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136:262–266, 2010. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000154](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000154)

Velickovic M., Zech Y. y Soares-Fraza S., Steady-flow experiments in urban areas and anisotropic porosity model. *Journal of Hydraulic Research*, 2016. <http://doi.org/10.1080/00221686.2016.1238013>

Wang H., Peng C., Li W., Ding C., Ming T. y Zhou N., Porous media: A faster numerical simulation method applicable to real urban communities. *Urban Climate*, 38(13):100865, 2021. <http://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100865>