

Modelo de Propagación de Inundación en Áreas Urbanas: Aplicación en la Ciudad de Bahía Blanca

Beron de la Puente Federico Javier^{1,2[0000-0003-4228-4593]}, Natalia V. Revollo^{3,4[0000-0002-2591-9123]}
and Gil Verónica^{1,2[0000-0002-2824-204X]}

¹ Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

³ Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras, Universidad Nacional del Sur, Argentina

⁴ Instituto de Ciencias e Ingeniería de la Computación - ICIC (CONICET/UNS), Argentina

fjberon@criba.edu.ar, nrevollo@criba.edu.ar, verogil@uns.edu.ar

Resumen. En los últimos años se han experimentado inundaciones asociadas a precipitaciones extremas que pueden resultar como consecuencia del cambio climático. Entonces el planeamiento urbano es una herramienta primordial para la gestión del crecimiento de las ciudades garantizando un desarrollo equilibrado entre el medio ambiente, infraestructura y la calidad de vida de los ciudadanos tomando en consideración la reducción de la peligrosidad a estos desastres naturales. Para ello, el objetivo general de este trabajo es la definición de un mapa de peligrosidad de inundación en zonas urbanas a partir de un modelo de inundación. El modelo se aplica en la Ciudad de Bahía Blanca en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. La validación del mismo se realiza con información provista por ciudadanos, expertos y mediciones in situ. A partir de los resultados del modelo, el 60% de la superficie de la ciudad estuvo bajo más de medio metro de agua, mientras que el restante 40% la altura no superó este valor. A partir de las validaciones, el modelo respecto de los datos obtenidos dio buenos ajustes, teniendo una buena confianza entre lo predicho por el modelo y lo que ocurrió en el terreno. El mapa de peligrosidad que se obtuvo a partir del modelo permitió identificar que las zonas de mayor impacto del evento, fueron en las cercanías al arroyo Napostá Grande y al canal Maldonado y las zonas bajas ubicadas en el sector SO y SE de la ciudad. Estos hallazgos proporcionan una herramienta para la planificación de políticas sociales, ambientales y económicas.

Palabras clave: Inundación, Modelado, Áreas urbanas. Peligrosidad de crecidas.

Flood Propagation Model in Urban Areas: Application to the City of Bahía Blanca

Abstract. In recent years, floods related to extreme precipitation events have been experienced as a consequence of climate change. Urban planning is therefore an essential tool for managing the growth of cities, guaranteeing a balanced development between the environment, infrastructure and the quality of life of citizens, taking into consideration the reduction of the risk of these natural disasters. Thus, the aim of this work is the definition of a flood hazard map for urban areas based on a flood model. The model is applied in the city of Bahía Blanca in the southwest of the Province of Buenos Aires, Argentina. In order to validate the model, information provided by citizens, experts and in situ measurements are used. According to the results of the model, 60% of the surface of the city was under more than half a metre of water, while the remaining 40% did not exceed this value. From the validations, the model with respect to the data obtained gave good fits, having a good confidence between what was predicted by the model and what happened on the ground. The hazard map obtained from the model identified that the areas of greatest impact of the event were in the vicinity of the Napostá Grande stream and the Maldonado canal and the low-lying areas located in the SW and SE sector of the city. These findings provide a tool for planning social, environmental and economic policies.

Keywords: Flood, Modeling, Urban areas, Flood Hazards.

1 Introducción

Las inundaciones, las tormentas severas y los terremotos son desastres naturales que pueden provocar grandes pérdidas económicas, sociales y ambientales, reducción de la biodiversidad y propagación de enfermedades. En particular, las inundaciones en sentido de destructividad ocupan el tercer lugar a nivel mundial. Debido al cambio climático se espera que aumente el riesgo de inundación asociado a la mayor frecuencia de precipitaciones intensas, el aumento de humedad en cuencas hidrográficas, así como el ascenso del nivel del mar (Wilby y Keenan, 2012).

En Sudamérica estos eventos hidrometeorológicos son los más frecuentes y se asocian con la mayor cantidad de muertes en la región (EM-DAT Homepage, 2025). En los últimos años, las inundaciones han aumentado con respecto a otros tipos de desastres. Brasil, Colombia y Perú experimentan el mayor número de desastres hidroclimáticos de la región. El evento más mortífero registrado en EM-DAT ocurrió en el estado de Río de Janeiro (Brasil) el 11 de enero de 2011. La Argentina no ha quedado exenta de este aumento presentando una cantidad de cuarenta y cinco inundaciones durante el periodo de 2000 a 2024. En este sentido, la provincia de Buenos Aires junto a Santa Fe, Entre Ríos y Córdoba presentan la mayor cantidad de ocurrencias en el país.

En las últimas décadas, hay una tendencia en el cambio en los patrones de lluvia e intensificación de eventos hidrometeorológicos derivados de precipitaciones extremas

(JRC, 2017) que se suma al crecimiento de la población que, sin adecuada planificación urbana, ocupan espacios inundables (De Mattos, 2010). Esto genera nuevos espacios expuestos a anegamientos o inundaciones, aumentando así la frecuencia de inundaciones urbanas (Barros et al., 2015). Es entonces que la planificación para la reducción del riesgo de desastres permitiría el crecimiento de las ciudades garantizando un desarrollo equilibrado entre el ambiente, la infraestructura y la calidad de vida de los ciudadanos, reduciendo la vulnerabilidad y aumentando la resiliencia (CEPAL Homepage, 2020). Por otra parte, la generación de cartografía de riesgo de inundación incluyendo estudios de peligrosidad y vulnerabilidad son instrumentos claves en esta planificación (Perles Roselló & Cantarero Prados, 2010). En la Argentina en el año 2016 se creó el Sistema Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (Ministerio de Defensa de la Nación Homepage, 2025) que tienen como objetivo fortalecer y optimizar las acciones destinadas a la reducción de riesgos, el manejo de la crisis (SINAGIR Homepage, 2025) y la recuperación por otra parte, en el 2020 se creó el Plan Nacional de Suelo Urbano para generar ciudades sostenibles y funcionales en 18 provincias (Plan Nacional de Suelo Urbano Homepage, 2022). En este sentido el monitoreo de este crecimiento resulta clave para la toma de decisiones sobre la evolución de las ciudades de cara a una mejor gestión del riesgo. Además del análisis de la expansión urbana es de importancia el estudio del comportamiento hidrológico de cuencas hídricas en diferentes escalas espaciales (Rojas-Ramírez, J. J. P. 2025; Volonté y Gil, 2021; Gil, 2010). Sumado a esto, el uso de modelos de simulación es una herramienta clave para planear estrategias que permitan minimizar los daños sobre las ciudades frente a diferentes escenarios hidrometeorológicos (Mediero et al., 2022).

Por otra parte, en los últimos años, los avances tecnológicos han permitido la creación de herramientas que permiten analizar, gestionar y predecir eventos de inundación en grandes áreas geográficas (van den Bout, et al., 2023). Existen software de libre acceso que se han utilizado en diferentes estudios a nivel mundial. Entre los de modelados 2 D se encuentran el FwDET que calcula la profundidad de la inundación casi en tiempo real utilizando la capa de la extensión de la inundación y un modelo digital del área (Cohen et al., 2018); el GeoFlood que utiliza ecuaciones de aguas someras, que tiene gran precisión en la propagación de las ondas de inundación en áreas complejas, como la presa Malpasset (Kyanjo et al., 2024); Morpho 2DH de iRIC como el caso de Brasil donde se analizó con este el flujo de escombros tras una inundación (Franck y Kobiyama, 2025) y el HEC-RAS mundialmente conocido, con un modelo SWMM en 2D, que modela zonas de inundación, como también eventos torrenciales de precipitación (Khatooni et al., 2025; Namara et al., 2022; Brunner, 2010). En el año 2021 se desarrolló Fast Flood model, que permite obtener simulaciones en corto tiempo con un 97% de eficiencia frente a otros modelos que se usan tradicionalmente (Van Den Bout et al., 2023). Esta herramienta se transformó en una plataforma de libre acceso, la cual está vinculada con datos globales de usos del suelo, datos de infiltración, descarga y corrección de modelos digitales de elevación y datos grillados de precipitación (University of Twente, 2025).

El 7 de marzo de 2025 la ciudad de Bahía Blanca registró la mayor inundación de su historia y fue noticia a nivel nacional durante varios días posteriores. El objetivo general de este trabajo es el desarrollo del escenario de inundación reciente y a partir de ello,

definir un mapa de peligrosidad de inundación en zonas urbanas que pueda servir de apoyo para la planificación de políticas sociales, ambientales y económicas. Si bien la simulación se realizó con información geográfica, los resultados fueron validados con información provista por los videos y fotografías tomadas por la ciudadanía, personas expertas y mediciones in situ.

2 Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

La ciudad de Bahía Blanca es la cabecera del partido homónimo y se localiza en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Según el censo 2010, la ciudad cuenta con 301.572 habitantes. Gran parte del ejido urbano se extiende sobre la cuenca inferior del arroyo Napostá Grande, cuyo cauce atraviesa la ciudad (Fig. 1). La cuenca nace en las Sierras de la Ventana y tiene un régimen netamente pluvial. La zona está comprendida en una franja climática semiárida, donde la precipitación anual promedio es 644 mm (1960-2014). Durante el año, las precipitaciones tienen una marcada estacionalidad, siendo los meses de mayores montos acumulados entre noviembre y marzo, con picos en diciembre y enero como meses más lluviosos. En cambio, entre los meses de abril y octubre se presentan los menores registros, siendo el mes de julio el de menor precipitación media (Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2025).

Históricamente la ciudad registró varias inundaciones que se produjeron por lluvias intensas en diferentes sectores de la cuenca del arroyo Napostá Grande, las mayores ocurrieron en los años 1884, 1933 y la última en el año 1944. Como consecuencia de ésta última, cuatro años después se comenzó la realización de dos grandes obras hidráulicas, el dragado y ensanche del Napostá y la construcción del aliviador Maldonado (Mastrandrea y Pérez, 2020; Zapperi, 2012). Sin embargo, desde el punto de vista de la hidrografía urbana, la ciudad no solo está estructurada por el arroyo Napostá y el canal derivador, sino que existen escurrimientos de orientación norte-sur que no tienen relación directa con el arroyo, sino que dependen de la morfología y las pendientes. En este sentido se identificaron, a partir de la utilización de curvas de nivel de 1 metro de equidistancia de un plano altimétrico 1:10.000 del año 1967, numerosas redes de drenaje natural (Zapperi, 2014).

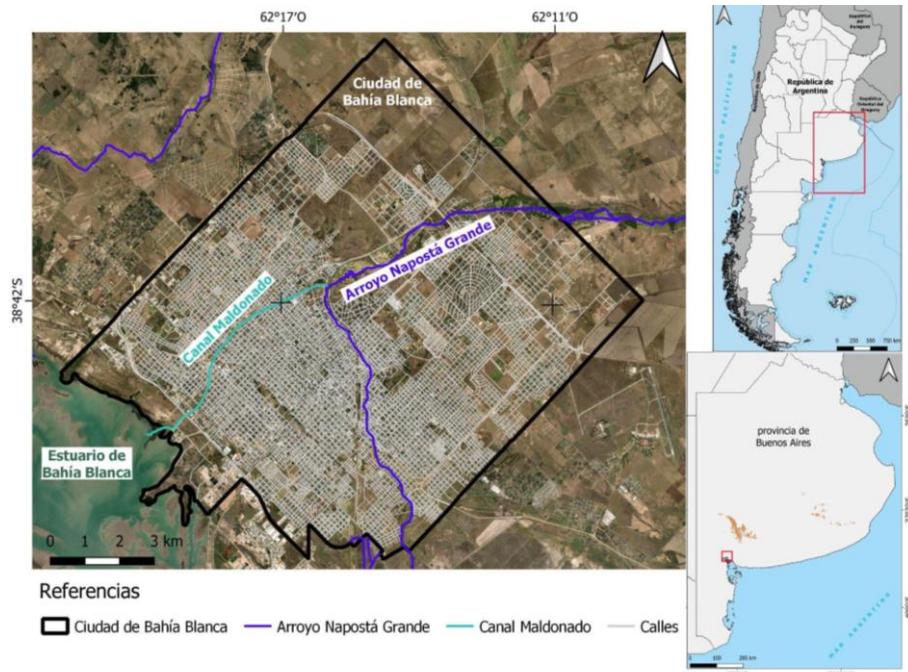


Fig. 1. Localización de la ciudad de Bahía Blanca en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Gran parte de la ciudad es atravesada por el arroyo Napostá Grande y el canal Maldonado. Fuente: elaboración propia.

2.2 Metodología

Adquisición de Datos

El modelo requiere información correspondiente a la elevación del terreno, la cobertura del suelo, datos de infiltración del suelo, el cálculo de coeficiente de Manning (Chow et al., 1994), información geográfica de arroyos, canales y ríos. Es posible la obtención de esta información mediante el uso de modelos y datos globales. Para ello se selecciona una región de interés (ROI) correspondiente a la zona de estudio. La elevación del terreno se obtiene mediante la ROI del modelo digital de elevación (MDE) de Copernicus el cuál posee una resolución espacial de 30 metros de tamaño de pixel en su versión GLO-30 Defence Gridded Elevation Data (DGED) (European Space Agency, 2024). Este modelo tiene una corrección de las costas y litorales, así como estructuras del terreno.

La representación geoespacial del Arroyo Napostá Grande y el canal Maldonado, se realizó mediante la digitalización en formato vectorial sobre imágenes Airbus de alta resolución de 0.50 cm en la plataforma Google Earth. El milimetrage de precipitaciones registrado durante el evento del 7 de marzo de 2025 corresponde a 290 mm (Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2025).

En la plataforma FastFlood model se utilizaron una serie de datos globales; estos fueron mapas de suelos y de infiltración. Los mismos se descargan y recortan automáticamente. Para el mapa de usos y cobertura del suelo, se usa el provisto por la ESA global land cover 10 metros de resolución, donde a partir de este se obtiene el coeficiente de Manning necesario para el modelado hidrológico, el cual representa la rugosidad del suelo afectando la velocidad de flujo del agua sobre la superficie (Kalyanapu et al., 2009; Mtamba et al., 2015). Los valores de Manning están en rangos entre 0 y 1, donde valores cercanos a 1 disminuyen la velocidad de flujo y favorecen la acumulación de agua.

Los datos de infiltración se descargaron de SoilGrids con una profundidad entre 5 y 15 centímetros (<https://soilgrids.org/>). Este dato es importante, ya que hace referencia a la cantidad de agua que se infiltra en el suelo (mm/hora); esta estimación se realiza a través del uso de los datos de textura del suelo y cantidades de materia orgánica mediante las funciones de Saxton y Rawls (2006).

Modelado de la inundación

Para modelar la inundación ocurrida el 7 de Marzo de 2025 se utilizó la plataforma FastFlood (Fig. 2). Este modelo tiene la característica de ser un instrumento de simulación de inundaciones de alta velocidad, desarrollado en el año 2021 (Fast Flood model Homepage, 2025). El modelo está basado en la teoría de flujo, donde las ecuaciones consideran que el flujo de entrada es constante en el tiempo y dan como resultado flujos no dinámicos (de Saint-Venant, 1871). Es entonces cuando el campo de velocidad es constante y la conservación de masa hace que la entrada sea igual a la salida. Una propiedad derivada, es que este flujo de acumulación de agua a través de una red es igual a la descarga en un estado estacionario. El modelo utiliza un algoritmo de estado estacionario, el cual es muy eficiente ya que reduce los tiempos de cálculo (Zhao, 2005). La implementación del mismo permite que el movimiento de partículas recorra grandes extensiones en una sola iteración, dando como resultado que la resolución de la acumulación de flujo se resuelve rápidamente.

A continuación, para compensar el estado estacionario parcial se utilizan propiedades de las redes de drenaje y se aplican parámetros de la cuenca bajo estudio. Luego, se calcula el caudal máximo para cada punto, el cual se combina con las velocidades de flujo del agua. Se determina entonces para cada punto de la cuenca una fracción efectiva que confirma el estado parcial estacionario. Seguidamente, se realiza la acumulación inversa del caudal. Entonces se aplica una extensión de la ley de Manning, la cual toma en cuenta las fuerzas de fricción para estimar las alturas de flujo a partir de la descarga del estado estacionario ya obtenido.

Finalmente se obtiene el balance de momento basado en la ley de fricción de Darcy-Weisbach y un término de gravedad linealizado. El solucionador de ondas difusivas incluye las influencias de la gravedad, la fricción, la presión y la advección e ignora los términos inerciales (Glas, V. 2023) (Fig. 2).

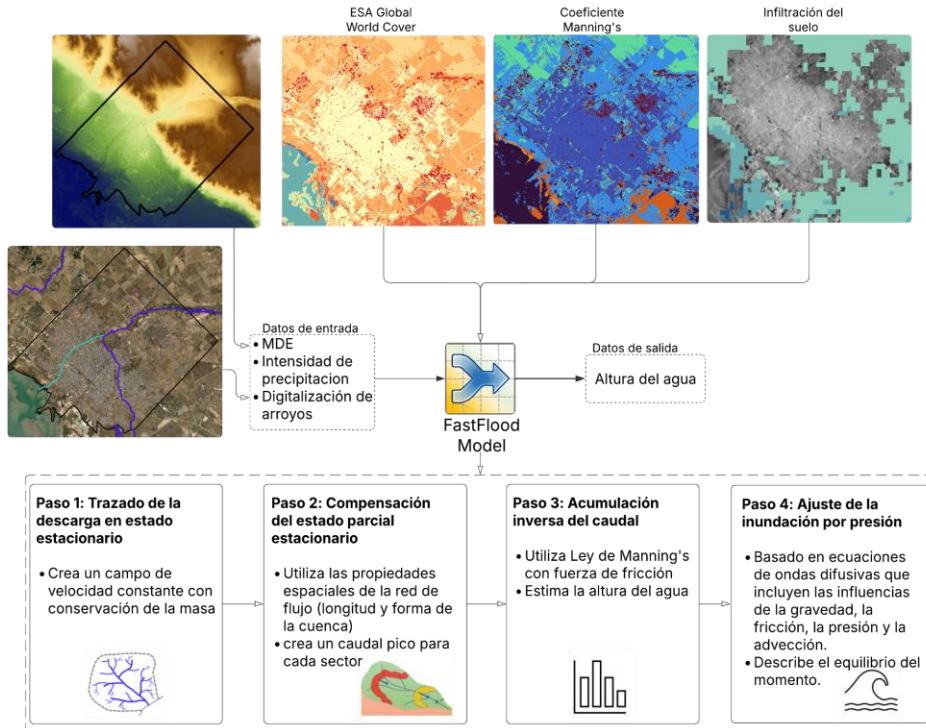


Fig. 2. Framework conceptual de FlashFlood model. Información geográfica y alfanumérica de entrada y metodología del modelo.

Fuente: modificado a partir de Glas (2023)

Validación

La validación del modelo de inundación obtenido se realizó mediante información *in situ* y proveniente de registros realizados por ciudadanos que reportaron presencia y alturas de agua (Fig. 3). La información es extraída de redes sociales y comunicaciones personales y el conjunto de datos cuenta con un total de cuarenta puntos distribuidos en la ciudad. En la validación de los resultados del modelo se calcularon las siguientes métricas:

- El error absoluto promedio (MAE), se calcula como la diferencia absoluta promedio entre los valores objetivo y los valores previstos. Esta métrica puede variar de cero a infinito, y cuanto más bajo sea el valor, mejor será la calidad del modelo.
- Error de la raíz cuadrada de la media (RMSE) es la raíz cuadrada de la diferencia cuadrada promedio entre los valores objetivo y previsto. RMSE es más sensible a los valores atípicos que MAE. Cuanto más bajo el valor, mayor será la calidad del modelo donde 0 representa un predictor perfecto.

- Coeficiente de Pearson mediante el cálculo de la covarianza, donde los valores oscilan entre -1 y 1. Aquí -1 significa una perfecta correlación lineal negativa y +1 una perfecta correlación positiva.

El segundo conjunto de datos se obtuvo mediante el aporte de información proveniente de una plataforma web participativa (<https://aguantebahia.com>) en donde los ciudadanos reportaron diferentes eventos ocurridos como caminos o puentes cortados, corte de servicios (electricidad, agua, gas) y zona inundada. Este dataset contiene 179 localizaciones que reportan caminos cortados, 950 puntos sobre información relacionada a diferentes servicios y en 77 puntos de la ciudad se reportó zona inundada, sin especificar la altura del agua. La validación consistió en la contabilización de la proporción de coincidencias de los diferentes reportes respecto a si el modelo obtuvo alturas superiores a 0.50 m.

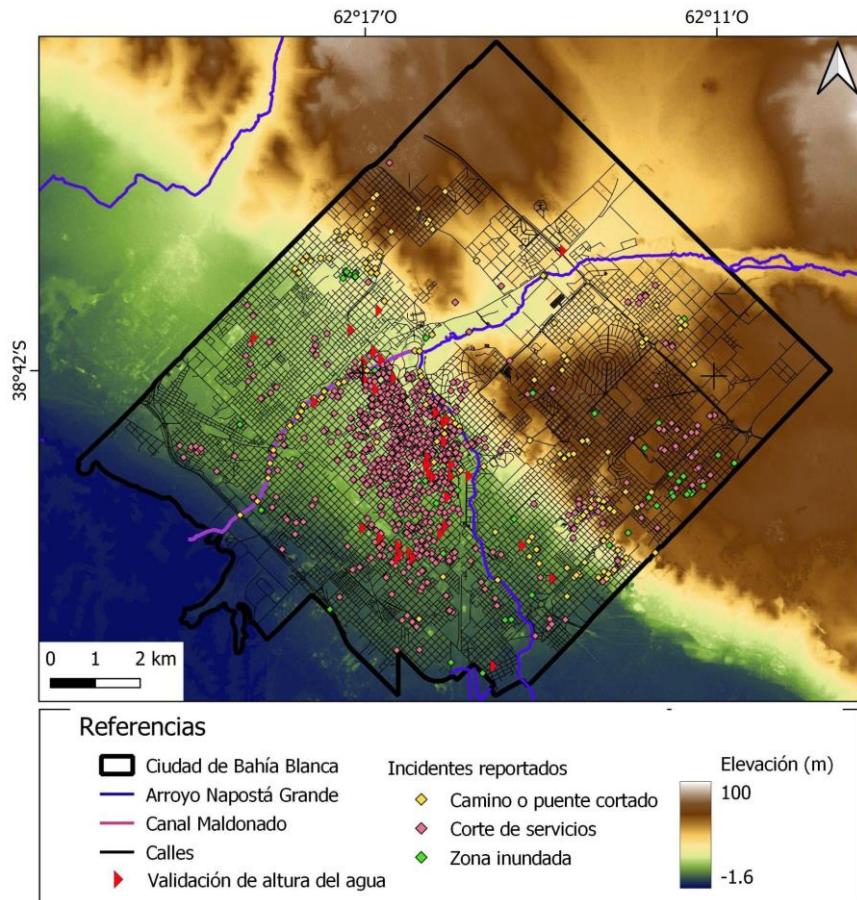


Fig. 3. Espacialización de incidentes reportados dentro del límite de la ciudad de Bahía Blanca. Fuente: elaboración propia a partir de "<https://aguantebahia.com>"

3 Resultados y discusión

3.1 Zonas de inundación para evento 290 mm

Según el informe del SMN, el evento de precipitación del día 7 de marzo acumuló en solo 12 horas unos 290 mm, con una intensidad de lluvias aproximada de 25 mm/h. Este registro fue mayor que el valor de 150.9 mm/día del último evento de precipitación extrema en el mes de febrero de 1975 (Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2025). Además, este valor superó las precipitaciones máximas históricas del mes de marzo (109.8 mm) en el período comprendido entre los años 1961 y 2024.

El modelo de inundación para la ciudad de Bahía Blanca posee cuatro intervalos con valores de altura de agua que van desde 0 a 10 m (Fig. 4). Las zonas más oscuras son las que presentan valores más altos y se encuentran más propensas a inundaciones mientras que las más claras son las regiones con menor altura de agua. Este mapa de inundaciones sobre la superficie de 128 km² de Bahía Blanca permite mostrar una predicción de la cantidad de áreas afectadas para cada intervalo. Un total de 20.71 km² tuvo valores que no superaron los 0.05 metros, mientras que 32.92 km² de la superficie tomó valores entre 0.05 - 0.50 metros. Para valores entre 0.50 y 1 metro de altura del agua fue afectada una superficie de 31.69 km² y los sectores donde el agua llegó a más de un metro representa unos 42,61 km².

Esto significa que, casi el 74.30 km² de la superficie tomó valores mayores a 0.50 metros donde casi un 60% de la superficie de la ciudad fue afectada gravemente por la inundación, occasionando pérdidas materiales en un amplio sector de la ciudad.

A partir del análisis de la cartografía generada por el modelo, se puede observar que las zonas más afectadas fueron las inmediaciones del Arroyo Napostá Grande (rojo), Canal Maldonado (verde) y el sector de la periferia de la ciudad, sobre todo el ubicado en el SO y SE donde el agua superó el metro de altura.

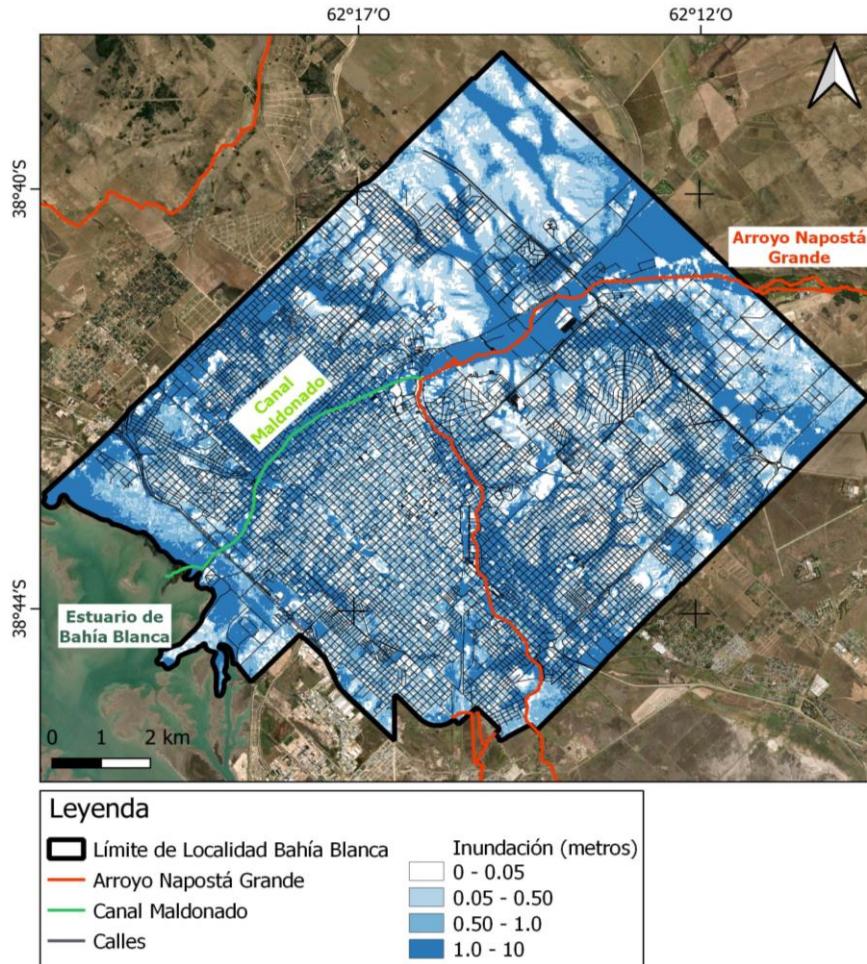


Fig. 4. Modelado de ocurrencia de inundación para el evento de precipitación del 7 de marzo de 2025 en la ciudad de Bahía Blanca. Es posible notar cuatro intervalos de valores de alturas de agua.

3.2 Validación de los resultados

Las métricas MAE y RMSE poseen valores de 0.095 y 0.155 para el primer conjunto de datos de validación. El valor de MAE es cercano a 0, lo que asegura que el resultado, las estimaciones y los datos medidos son cercanos en todo el rango de muestras. Para el caso RMSE su valor también está cercano a 0; esto significa que la precisión es muy cercana entre lo modelado y observado. Además, se obtuvo la correlación de Pearson positiva con un valor de 0.906.

Por otro lado, para los reportes ocurridos durante el evento, su validación se llevó a cabo mediante la obtención de la proporción de coincidencias entre los diferentes reportes efectuados y zonas donde el modelo detectó la altura del agua mayor a 0.50

metros. Entonces las coincidencias fueron para camino o puente cortado: 0.87, corte de servicios: 0.70 y para el reporte de zona inundada: 0.73.

3.3 Peligrosidad de inundación o anegamiento

A partir de los resultados obtenidos, se adaptó el modelo de inundación con una reclasificación con cuatro categorías de peligrosidad: bajo, medio, alto y muy alto coincidente con los intervalos que genera el modelo (Fig. 5). Este tipo de cartografía de inundación permite comprender cuáles zonas podrían ser afectadas durante eventos extremos. Esta información es crucial para la adopción de medidas de planificación urbana para la reducción de daños a futuros eventos similares.

En la categoría de muy alto que representa las mayores alturas de agua modelada, se puede observar un patrón de drenaje dendrítico. Esto coincide con el drenaje natural de la ciudad obtenido mediante la digitalización manual de cartas altimétricas y el uso de curvas de nivel por Zapperi (2012). Los patrones obtenidos en ambos casos se caracterizan por mostrar una ramificación donde los tributarios se unen al cauce principal. En este caso derivando hacia el arroyo Napostá Grande o el canal Maldonado, dirigiéndose hacia el estuario de Bahía Blanca.

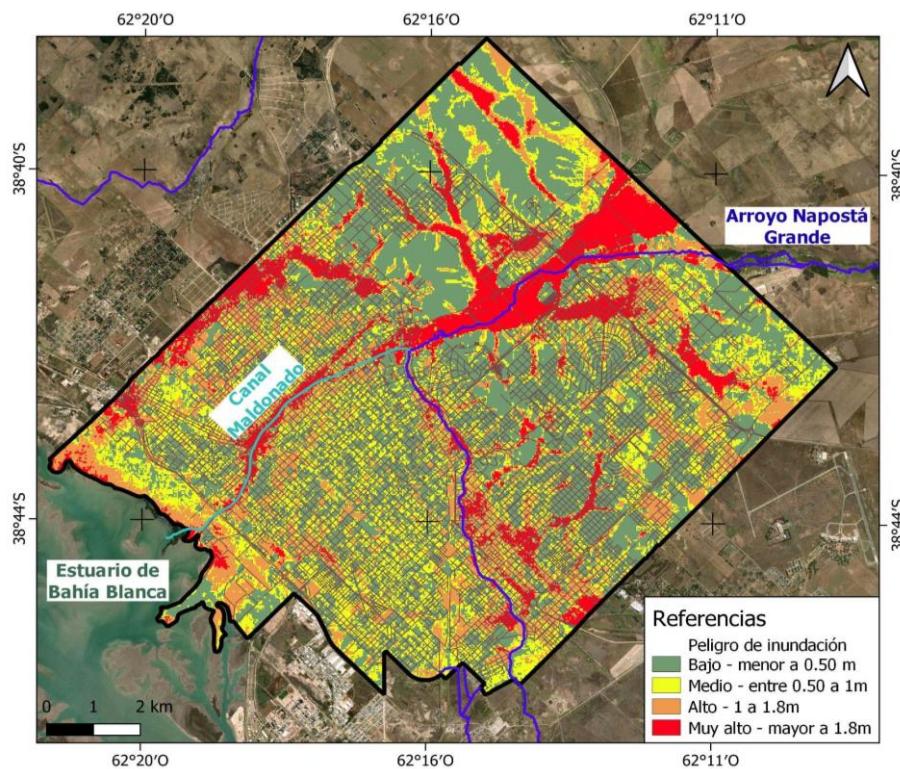


Fig. 5. Mapa de peligrosidad de inundación recategorizado a partir de los intervalos de altura de agua obtenidos por el modelo FastFlood app para la ciudad de Bahía Blanca.

4 Conclusiones

Los modelos de predicción de inundaciones son herramientas importantes para la gestión de ocurrencias de tormentas severas. Estos permiten contar con información para la elaboración de planes de gestión cuya finalidad es reducir pérdidas humanas, económicas y ambientales, así como optimizar la planificación del territorio. Combinando imágenes satelitales, mediciones in situ y el conocimiento de personas expertas estos modelos identifican zonas de mayor vulnerabilidad, brindan apoyo para las alertas tempranas y la toma de decisiones.

Los resultados obtenidos a partir del modelo permiten la simulación de inundaciones a escala urbana, donde para el caso de estudio de la ciudad de Bahía Blanca, el 60% de la superficie de la ciudad estuvo bajo más de medio metro de agua, mientras que el restante 40% la altura no superó este valor. Por otra parte, las zonas más afectadas fueron las inmediaciones del Arroyo Napostá Grande y del canal Maldonado (verde) como también el sector de la periferia de la ciudad. A partir de las validaciones realizadas, tanto el MAE, RMSE y la correlación de Pearson, se puede afirmar que los ajustes son buenos y esto lo da un nivel bueno de confianza entre lo predicho por el modelo y lo que ocurrió en el terreno.

El uso de FastFlood model permite una reducción sustancial en los tiempos de cálculo, permitiendo la simulación de diferentes escenarios de inundaciones de manera sencilla y con el uso de pocos datos de entrada. Además, estas simulaciones ayudarán a identificar espacios expuestos al peligro de inundación y a fundamentar las estrategias de gestión de las lluvias torrenciales o extraordinarias.

Referencias

- Aguante Bahía Homepage, <https://aguantebahia.com/>, last accessed 2025/04/14.
- Barros, V. R., Boninsegna, J. A., Camilloni, I. A., Chidiak, M., Magrín, G. O. y Rusticucci, M. (2015). Climate change in Argentina: trends, projections, impacts and adaptation. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Chang, 6(2), 151-169. <https://doi.org/10.1002/wcc.316>
- Brunner, G. W. (2010). HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 4.1.
- CEPAL (2020). Observatorio Regional de Planificación para el Desarrollo de América Latina y el Caribe Homepage, <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/nota/la-planificacion-para-el-desarrollo-y-la-gestion-del-riesgo-de-desastres>, last accessed 2025/04/30.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays L.W. (1994). Hidrología Aplicada. McGrawHill, Bogotá. 584 pp.
- Cohen, S., Brakenridge, G. R., Kettner, A., Bates, B., Nelson, J., McDonald, R., ... y Zhang, J. (2018). Estimating floodwater depths from flood inundation maps and topography. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 54(4), 847-858.
- EM-DAT. Homepage, <https://public.emdat.be/>, last accessed 2025/04/30.

- De Mattos, C. A. (2010). Globalización y metamorfosis metropolitana en América Latina: de la ciudad a lo urbano generalizado. *Revista de Geografía Norte Grande*, (47), 81-104. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rgeong/n47/art05.pdf>
- De Saint-Venant. (1871). Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et a l'introduction de marées dans leurs lits. *Comptes Rendus des Séances de Académie des Sciences*, 73, 147, 237.
- European Space Agency (2024). Copernicus Global Digital Elevation Model. Distributed by OpenTopography. <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>.
- Fast Flood Model Homepage, https://fastflood.org/site/_site/, last accessed 2025/04/14.
- Franck, A.G. y Kobiyama, M. (2025). Análisis del rendimiento y la sensibilidad del modelo Morpho2DH en eventos extremos en el sur de Brasil. *Revista Sudamericana de Ciencias de la Tierra*, 152, 105275.
- Glas, V. (2023). Application of the fast flood simulation model for local risk-informed decision-making on flood risk reduction: a case study of Pamba Basin, Kerala India (Master's thesis, University of Twente).
- Gil, V. (2010). Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce grande aplicada al peligro de crecidas. (Tesis Doctoral). Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur. <https://portal.amelica.org/ameli/journal/615/6154243008/html/>
- JRC. Atlas of the Human Planet. (2017). Global Exposure to Natural Hazards. European Commission. DG Join Research Center.
- Kalyanapu, A., Burian, S., y McPherson, T. N. (2009). Effect of land use-based surface roughness on hydrologic model output. *Journal of Spatial Hydrology*, 9(2), 51–71. <https://scholarsarchive.byu.edu/josh/vol9/iss2/2/>
- Khatooni, K., Hooshyaripor, F., MalekMohammadi, B. y Noori, R. (2025). Un nuevo enfoque para la evaluación del riesgo de inundaciones urbanas mediante el modelo acoplado SWMM-HEC-RAS-2D. *Journal of Environmental Management*, 374, 123849
- Kyanjo, B., Calhoun, D., y George, D. L. (2024). GeoFlood: Computational model for overland flooding. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.15435>
- Mastrandrea, A. y Pérez, M. I. (2020). Representaciones sociales del riesgo hídrico en el sector inferior de la cuenca del arroyo Napostá Grande: un abordaje histórico-ambiental (1828-2018). *Investigaciones Geográficas*, (74), 197-222. <https://doi.org/10.14198/INGEO2020.MP>
- Mediero, L., Soriano, E., Oria, P., Bagli, S., Castellarin, A., Garrote, L., ... y Schröter, K. (2022). Pluvial flooding: High-resolution stochastic hazard mapping in urban areas by using fast-processing DEM-based algorithms. *Journal of Hydrology*, 608, 127649, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127649>
- Mtamba, J., Velde, R. V. D., Ndomba, P. Z., Zoltán, V. F., y Zoltán, V. (2015). Use of radarsat-2 and landsat tm images for spatial parameterization of manning's roughness coefficient in hydraulic modeling. *Remote Sensing*, 7(1), 836–864. <https://doi.org/10.3390/rs70100836>
- Namara, W. G., Damisse, T. A., y Tufa, F. G. (2022). Application of HEC-RAS and HEC-GeoRAS model for Flood Inundation Mapping, the case of Awash Bello Flood Plain, Upper Awash River Basin, Oromiya Regional State, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2), 1449–1460. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01166-9>

- Perles Roselló, M. J. y Cantarero Prados, F. (2010). Problemas y retos en el análisis de los riesgos múltiples del territorio: propuestas metodológicas para la elaboración de cartografías multi-riesgos. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (52), 245-271.
- Plan Nacional de Suelo Urbano 2022 Homepage, <https://www.argentina.gob.ar/habitat/plan-nacional-de-suelo-urbano>, last accessed 2025/04/30.
- Rojas-Ramírez, J. J. P. (2025). Inundaciones y expansión urbana, sus implicaciones socioambientales. *La Gestión de Riesgos por inundación en Guadalajara metropolitana, México. Revista de Geografía Norte Grande* (91). <https://doi.org/10.4067/S0718-34022025000200104>
- Saxton, K.E. y Rawls, W.J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70, 1569-1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) Homepage, <https://www.argentina.gob.ar/smn>, last accessed 2025/04/14
- Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo Integramos y articulamos las acciones de todos los organismos para la reducción de riesgos, manejo y recuperación frente a emergencias y desastres (SINAGIR) Homepage, <https://www.argentina.gob.ar/sinagir>, last accessed 2025/04/14.
- University of Twente Homepage, <https://www.geoversity.io/stories/1400175/predicting-floods-in-real-time/>, last accessed 2025/04/30.
- Van den Bout, B., Jetten, V.G, Westen, C.J. y Lombardo, L. (2023). A break-through in fast flood simulation. *Environmental Modelling & Software*. 168. 105787. [10.1016/j.envsoft.2023.105787](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105787)
- Volonté, A. y Gil, V. (2021). El índice hidrogeomorfológico como herramienta para la gestión del territorio fluvial: Cuenca del arroyo San Bernardo, Argentina. *Finisterra*, 56(117), 199-214. <https://doi.org/10.18055/Finis20798>
- Wilby, R. L., y Keenan, R. (2012). Adapting to flood risk under climate change. *Progress in physical geography*, 36(3), 348-378
- Zhao, H. (2005). A fast-sweeping method for eikonal equations. *Math. Comput.* 74 (250), 603–627.
- Zapperi, P. A. (2012). Hidrografía urbana de Bahía Blanca. (Tesis doctoral). Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur.
- Zapperi, P. A. (2014). Caracterización del escurrimiento urbano en la ciudad de Bahía Blanca. *Revista Universitaria de Geografía*, 23(2), 125-150.