

## MODELACIÓN HIDRODINÁMICA BIDIMENSIONAL BAJO ENFOQUES IMPLÍCITOS Y EXPLÍCITOS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE INUNDACIONES EN ÁREAS URBANAS UBICADAS EN ZONAS DE LLANURA A TRAVÉS DE HERRAMIENTAS DE USO LIBRE Y RPAS.

### TWO-DIMENSIONAL HYDRODYNAMIC MODELING UNDER IMPLICIT AND EXPLICIT APPROACHES FOR COMPREHENSIVE FLOOD MANAGEMENT IN URBAN AREAS LOCATED IN PLAIN AREAS THROUGH FREE-USE TOOLS AND RPAS

Crysthian D. Sánchez<sup>a</sup>, Ignacio. Villanueva<sup>b</sup> y Cristian C. Guevara<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Mecánica Computacional, Universidad Nacional de Villa Carolina, Los Alerces 3492, 4200 Villa Carolina, Argentina, [gmc@uncarolina.edu.ar](mailto:gmc@uncarolina.edu.ar), <http://www.uncarolina.edu.ar/gmc>

<sup>b</sup>Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul, provincia Buenos Aires, Argentina, [ivillanueva@ihlla.org.ar](mailto:ivillanueva@ihlla.org.ar)

**Palabras clave:** Hidrodinámica urbana, Modelado hidráulico, Gestión de riesgos naturales, Sistema de alerta temprana para inundaciones, Topografía de alta resolución, Teledetección y drones en hidrología, Análisis de riesgos hidrológicos urbanos, Validación y calibración de modelos hidrodinámicos.

**Resumen.** Este estudio presenta una metodología para analizar inundaciones en áreas urbanas llanas. Se comparan dos modelos hidrodinámicos, HEC-RAS e IBER, con el objetivo de establecer un modelo de pronóstico de inundaciones para sistemas de alerta temprana. Se utilizan drones con fotogrametría digital para obtener datos de topografía detallada. Los resultados permiten generar un modelo predictivo de inundaciones que se integra con el modelo hidrológico de la ciudad de Azul, facilitando la simulación de eventos. Se destaca la importancia de la calidad de los datos para calibrar y validar el modelo y su aplicabilidad en la gestión de inundaciones y sistemas de alerta temprana.

**Keywords:** Comparative analysis, two-dimensional hydrodynamic models, urban flood simulation, plain areas, drone-based topography, early warning systems..

**Abstract.** This study presents a methodology for analyzing floods in urban areas located in plain regions. Two hydrodynamic models, HEC-RAS and IBER, are compared with the aim of establishing a flood forecasting model applicable to early warning systems. Drones equipped with digital photogrammetry are utilized to obtain high-resolution topographic data. The obtained results enable the generation of a predictive flood model that integrates with the hydrological model of the city of Azul, facilitating event simulation. The significance of data quality in calibrating and validating the model is emphasized, highlighting its relevance in flood management and early warning systems.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de inundación son una problemática a nivel mundial que generan importantes pérdidas socioeconómicas (Pérez (2004)). Los casos más relevantes se han presentado en el continente asiático, fundamentalmente en China en el año de 1887, donde el río Yanzi y el río Amarillo, causaron la muerte de aproximadamente 6.000.000 de habitantes. Otro caso notable, se registró en Bangladesh en el año 1988 donde resultaron afectados 30 millones de habitantes y de los cuales se estima que 2.000 perdieron la vida (Hermelin (2005)). En la región europea se han presentado varios de estos fenómenos, como el que afectó a Alemania en el año 2013, el cual generó pérdidas económicas superiores a los USD 16.500 millones (Ceballos et al. (2016)).

Particularmente en la ciudad de Azul, ubicada dentro de la provincia de Buenos Aires, la problemática de las inundaciones se ha tornado crítica durante los últimos 40 años, lo cual obedece al aumento de los periodos húmedos en la provincia de Buenos Aires (Antico y Sabbione (2010)), al avance de la urbanización sin control (Hollis (1975)), la pavimentación de áreas permeables (Sanchez (2015)), reducción de la proporción de pasturas y forestaciones a causa del avance de la frontera agropecuaria (Pfster et al. (2004)) y finalmente a un sistema deficiente de alcantarillado. Por todo lo anterior se ha generado un aumento de los escurrimientos superficiales y caudales picos.

Entre los años 1980 y 2012 la ciudad de Azul, se ha visto afectado por 8 inundaciones: abril de 1980, noviembre de 1985, febrero 1992, junio de 2001, agosto 2002 y las 3 registradas en el año 2012, una en el mes de mayo del 2012 y dos sucesivas en el mes de agosto. Se estima que los desbordes del arroyo en mayo del 2012 afectaron al 30 por ciento de la población y alrededor de 80 manzanas para los eventos de inundación del año 2012 (Cazenave (2012)). El evento acontecido en abril de 1980 se considera como una de las inundaciones que más ha impactado la estructura y el funcionamiento de la ciudad de Azul, dado que en una semana precipitaron cerca de 477 mm, los cuales anegaron un 80 por ciento de la superficie del partido y generó un impacto económico de 14.936 millones de pesos argentinos (Peluso et al. (1999)).

Para evaluar, monitorear y mitigar el impacto de los excesos hídricos en áreas urbanas ubicadas en zonas de llanura, se requiere el uso de modelos hidrodinámicos, los cuales permiten analizar los patrones de flujo, velocidades, caudales, profundidades del agua y su dinámica en las planicies de inundación. Actualmente existen modelos hidrodinámicos bidimensionales (2D), los cuales representan con mayor precisión la dinámica de los flujos multidireccionales de baja velocidad típicos de inundaciones en áreas de llanura (LLulén y Blade (2005)). Estos modelos resuelven las ecuaciones de Saint Venant en las dimensiones X, Y, permitiendo describir los movimientos del agua en cauce y en planicie.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El objetivo principal de este estudio es desarrollar una metodología sólida y precisa para el análisis de inundaciones en áreas urbanas situadas en zonas de llanura. El propósito fundamental de esta metodología es permitir la creación de un modelo de pronóstico de inundaciones que sea aplicable y eficiente dentro de un sistema de alerta temprana.

Para lograr este objetivo, se llevará a cabo un enfoque integral que combina la hidrología, la hidrodinámica y el uso de tecnología avanzada, como teledetección y drones, para la obtención de datos de alta resolución topográfica. Se pretende superar los desafíos específicos que enfrenta la gestión de inundaciones en áreas urbanas, considerando factores como la complejidad del entorno urbano, el rápido crecimiento urbano y las interacciones entre el sistema de drenaje y el ambiente construido.

## 2.1. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en el centro de la provincia de Buenos Aires 1, limita hacia el norte con los partidos de las Flores y Tapalqué; al este con los partidos de Rauch y Tandil; con el partido de Olavarría al oeste y con Benito Juárez al sur. Se halla comunicado con todo el país a través de las rutas nacionales N° 3 y 226, las provinciales N° 51 y 60. Dista 300 km de la Capital Federal, 240 km del puerto de Quequén y 365 km de Bahía Blanca. La ciudad de Azul, está inmersa en la cuenca del arroyo del Azul, entre los 59° 50' y 59° 54' de longitud oeste, y 36° 45' y 36° 49' de latitud sur, oscila entre los 140 y 130 metros sobre el nivel del mar.

Según (Guevara et al., 2017), la zona de estudio presenta un régimen isohigro de precipitación, destacando a enero como el mes de mayor precipitación con un promedio de 114 mm y a junio como el menos lluvioso con un promedio de 38 mm. La precipitación promedio anual para el periodo 2003-2014 es de 902 mm.



Figura 1: Localización de la ciudad de Azul.

## 2.2. RELEVAMIENTO TOPOGRÁFICO

Se aplicó la metodología de fotogrametría digital para adquirir datos de alta resolución topográfica y generar un ortofotomosaico de 1900 hectáreas de la ciudad de Azul, incluyendo la impronta medida en inundación del evento de mayo de 2012. Para ello, se llevaron a cabo mediciones de 99 puntos de fotocontrol mediante la utilización de metodología GPS diferencial. La planificación de los vuelos se realizó a una altura de 60 metros con un traslape de imágenes del 80 por ciento en dirección longitudinal y del 70 por ciento en dirección transversal.

Luego, se llevó a cabo el procesamiento digital de las imágenes aéreas para generar una nube de puntos densa y georreferenciada, además de la creación del ortofotomosaico. Este proceso garantizó la obtención de información precisa y detallada sobre el terreno, permitiendo una visualización clara de las áreas afectadas por la inundación en mayo de 2012.

La fotogrametría por sí sola es insuficiente para la reconstrucción de un cuerpo de agua, esto

se debe a la obstrucción generada por bosque de galería y la difracción de la luz que genera el agua en movimiento. Estas condiciones dan como resultado imprecisiones (ruido) o falta de información en las inmediaciones de los cuerpos de agua, por tal razón, fue necesario reconstruir el canal del arroyo El Azul, utilizando 19 secciones de batimetría relevadas por el instituto de hidrología de llanuras

La reconstrucción del canal del arroyo el Azul, tuvo una longitud de 6.2km comprendida entre las cotas 125 y 135 , iniciando al sur en el paso de la vía Los Álamos y terminando al norte a la altura de la avenida Malere. con esta información se construye el corredor del arrollo teniendo en cuenta los anchos de canal medidos en la ortofoto y se genera un modelo digital de terreno del arrollo que se integra al obtenido mediante la fotogrametría, de esta manera se obtiene el modelo operativo para la implementación de modelos hidrodinámicos.

La validación del MDT se realizó con 568 puntos de GPS distribuidos por el área de estudio, se usaron 2 ecuaciones para calcular las incertidumbres, (I) coeficiente de determinación lineal  $R^2$  cuyo resultado fue de 0.985, demostrando una linealidad alta entre los valores simulados y los observados y (II) la raíz del error medio cuadrado (RMSE) el cual fue de 29.6 centímetros, dejando en evidencia que las incertidumbres en altura del modelo son considerablemente bajas, es importante resaltar que la incertidumbre vertical de los datos observados con GPS fue de 30 centímetros en promedio.

### 2.3. mapa de rugosidad

El mapa de rugosidades se construye a partir de clasificación supervisada por el método de árboles de decisión (random Forest), para ello se usará el ortofotomosaico relevado. La clasificación del ortofotomosaico obtenido por medio de fotogrametría digital, se realizará mediante la librería ARCPY de Python, para ello se generará una nube de puntos de clasificación manual para 5 coberturas ( canal, concreto, pastos, bosques y suelo desnudo), para las coberturas encontradas, la cual servirá para generar el archivo de entrenamiento.

### 2.4. HIDROGRAMA DE ENTRADA

Para la calibración de los modelos HEC-RAS e Iber se usó el hidrograma del evento acontecido en mayo del 2012 (Figura 5-22) medido en la estación de Seminario, aguas arriba de Azul, y el cual inicio el día 17 a las 18 horas y termino el 18 del mismo mes a las 23 horas, el caudal pico registrado fue de 286.19 m<sup>3</sup>/s.

Con el objetivo de optimizar el modelo, se selecciona una fracción del hidrograma comprendida entre el 15 de mayo a las 00:00 y el 19 a las 16:00. Esta elección permite abarcar desde un período de caudal base hasta algunas horas después del pico de la crecida, lo que resulta en la representación de únicamente la porción relevante del modelo. 2. 2.

### 2.5. MODELO HEC-RAS

Par la construcción del modelo HEC-RAS se utilizaron los siguientes insumos: mapa de rugosidad, modelo de topografía, puentes relevados e hidrograma de entrada medido a la altura de la estación seminario. Mediante la herramienta RAS-Mapper, se delimitó un área de cálculo de 745 ha, se ingresó la geometría de 4 puentes localizados sobre las avenidas, Güemes, Mitre, Pellegrini y San Martín.

En el modelo, se emplea una malla estructurada con una resolución de 15 metros para abarcar toda el área de estudio, a excepción de la zona de los puentes. En esta última área, se utiliza una malla no estructurada con el propósito de asegurar la estabilidad del modelo y la representación

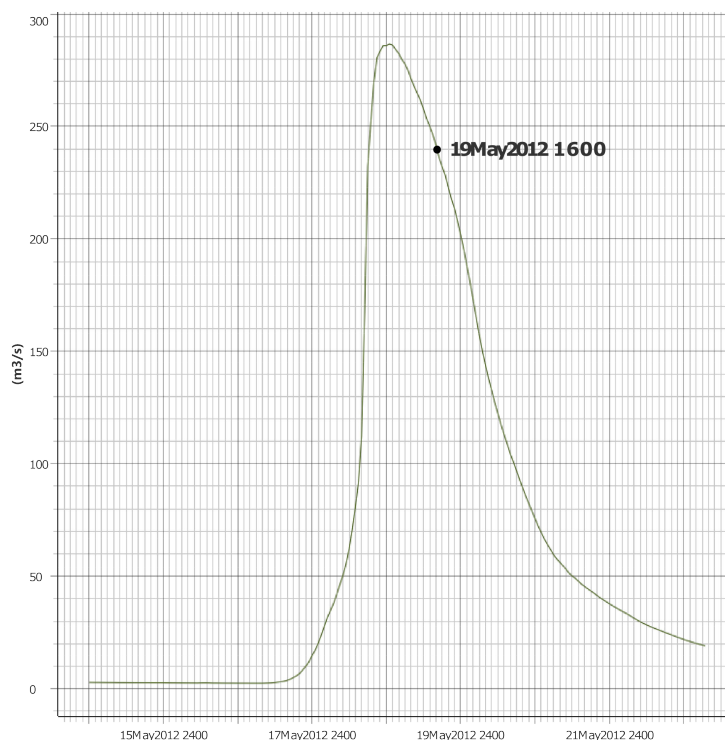


Figura 2: hidrograma de entreada

precisa de los fenómenos que ocurren en estas estructuras. Se empleó el resolvidor ELM-SWE (Euleriano-Lagrangiano).

## 2.6. MODELO IBER

Para la construcción del modelo IBER, se utilizaron diferentes técnicas para generar una simulación precisa del comportamiento hidráulico de la inundación. En primer lugar, se generó una malla no estructurada de Delaunay utilizando el plugin GMSH (<https://plugins.qgis.org/plugins/gmsh/>) en QGIS. Esta malla no estructurada sirvió como base para la asignación de valores de altura con el modelo digital de elevación, el cual se cargó al modelo IBER para asegurar una representación detallada del terreno. Además, se cargó el parámetro de rugosidades de Manning para simular las condiciones de fricción en el área urbana.

En cuanto al mallado de las calles, se utilizó un mallado mínimo de 5 metros para asegurar una representación detallada de la topografía urbana. Mientras tanto, en áreas planas y despejadas se utilizó un mallado de 10 metros. Con esta estrategia de mallado diferenciado, se logró obtener una representación precisa de la topografía.

En conjunto, todas estas técnicas permitieron alcanzar un mallado óptimo para el modelo calibrado, con un total de 122,906 triángulos.

Finalmente, se agregaron las geometrías de los puentes para asegurar una simulación más precisa del comportamiento hidráulico en la cuenca. En conjunto, todas estas técnicas permitieron la construcción de un modelo IBER que proporciona una representación fidedigna del comportamiento hidráulico en el área urbana, lo cual es fundamental para la toma de decisiones en proyectos hidrológicos y de gestión del agua.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. SENSIBILIDAD

Con el fin de optimizar el modelo se usa una fracción del hidrograma. Se realizaron 7 modelaciones para el evento de mayo de 2022 con un hidrograma de 112 horas, en las cuales se mantienen constantes la resolución espacial de la topografía a 50 cm, resolución del modelo de rugosidad de 1m y sub-grilla de 15m (para HEC-RAS). Como se evidencia en la tabla 1, el coeficiente de Manning se varía para todas las coberturas usando un único factor multiplicador, que varía según el escenario propuesto.

Cobertura	n-30 %	n-20 %	n-10 %	n medio	n+10 %	n+20 %	n+30 %
Concreto	0.0105	0.012	0.0135	0.015	0.0165	0.018	0.0195
Pastos	0.021	0.024	0.027	0.03	0.033	0.036	0.039
Suelo desnudo	0.0161	0.0186	0.0207	0.023	0.0253	0.0276	0.0299
Bosques	0.14	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26
Canal	0.0175	0.02	0.0225	0.025	0.0275	0.03	0.0325

Tabla 1: rango de variación del coeficiente Manning para los usos de suelo existentes

Se lleva a cabo una modelación para cada uno de los 7 escenarios de calibración propuestos, y se compara con la impronta obtenida en el terreno. La precisión de la representación del fenómeno se evalúa mediante el índice de Jaccard, utilizado con el objetivo de cuantificar la precisión en cada uno de los casos de las tablas 2 3. 3.

Escenario	Intervalo de calculo (s)	Tiempop de simulacion (H:m's")	Indice de Jaccard
Manning +30 %	30	0:'06'54"	0.71
Manning +20 %	30	0:06'44"	0.69
Mannig +10 %	30	0:07'28"	0.67
Manning Medio	30	0:12'02"	0.66
Manning -10 %	15	0:12'02"	0.66
Manning -20 %	15	0:11'34"	0.65
Manning -30 %	15	0:11'56"	0.66

Tabla 2: sensibilidad de rugosidad para sub grilla HEC-RAS de 15m

Escenario	Tiempop de simulacion (H:m's")	Indice de Jaccard
Manning +30 %	0:'24'32"	0.59
Manning +20 %	0:24'16"	0.58
Mannig +10 %	0:44'50"	0.61
Manning Medio	0:24'33"	0.66
Manning -10 %	0:24'39"	0.64
Manning -20 %	0:24'52"	0.60
Manning -30 %	0:24'52"	0.61

Tabla 3: sensibilidad de rugosidad para grilla flexible Iber de 5-10m



### 3.2. CALIBRACIÓN

Se llevaron a cabo iteraciones manuales en los modelos hidrodinámicos, impulsadas por un análisis de sensibilidad del coeficiente de Manning, con el objetivo de lograr una representación más precisa de la impronta de inundación. A través de estas iteraciones, se exploraron diferentes valores del coeficiente de Manning en áreas clave del modelo, permitiendo una adaptación gradual y refinada de los parámetros hidráulicos. Esta metodología se implementó con el propósito de afinar el modelo y ajustar los factores que influyen en el comportamiento de las aguas durante los eventos de inundación, en busca de una representación óptima y cercana a la realidad.

En la Tabla 4 se presentan los valores de los coeficientes de Manning que fueron aceptados tras la evaluación iterativa. Con el uso de estos valores, se logró alcanzar un índice de Jaccard de 0.748 en el modelo HEC-RAS, con un tiempo de cálculo de 17 minutos y 44 segundos para una grilla de 10 metros, Figura 3. Por otro lado, en el modelo dinámico de IBER, se logró un índice de Jaccard de 0.751 en un tiempo de cálculo de 25 minutos y 52 segundos. Cabe destacar que en el caso de IBER, se aprovechó la capacidad de procesamiento de la tarjeta gráfica mediante el uso del complemento IBER+ (lenguaje CUDA, C++) para acelerar los cálculos a través de GPU

Cobertura	Coefficiente de Manning
Concreto	0.015
Pastos	0.039
Suelo desnudo	0.018
Bosques	0.26
Canal	0.0325

Tabla 4: valores de Manning calibrados

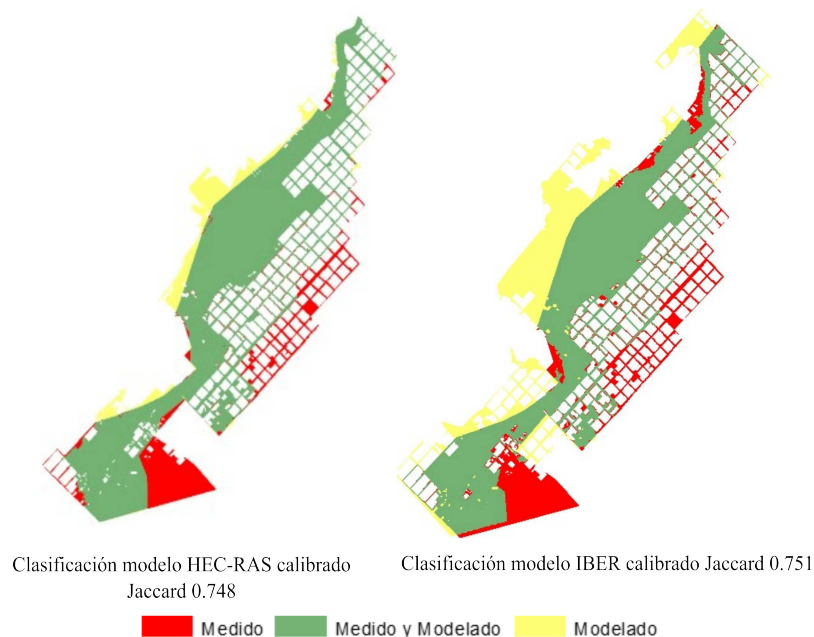


Figura 3: Resultados de los modelos calibrados

### 3.3. COMPARACIÓN MODELOS

La comparación de los resultados de ambos modelos simulados, evidenció que los tiempos de ejecución promedio de IBER fueron aproximadamente 2.91 veces más largos que los tiempos de ejecución de HEC-RAS, Figura 4. En promedio, HEC-RAS tomó alrededor de 9.86 minutos, mientras que IBER requirió aproximadamente 25.73 minutos, el modelo utilizado para la sensibilidad en HEC-RAS tiene el mallado de 15 metros mientras que el valor calibrado se adopta del modelo de 10 metros. Estos tiempos se logran con las características descritas en la tabla 5.

	CFL	mallado	NCeldas	Tipo de procesador
HEC-RAS (Implícito)	$\Delta t$ fijado (30, 15, 5) secs	$\Delta x = \Delta y = 10$ (estructurado)	295100	CPU 7 Nucleos 4.2 GHZ 64 GB-RAM
IBER (Explícito)	0.45	$\Delta I = 5-10$ (flexible no estructurado, Delaunay)	122906	GPU 768 Cores 1291 MHz Bale Clock 16 GB Memory

Tabla 5: características computacionales

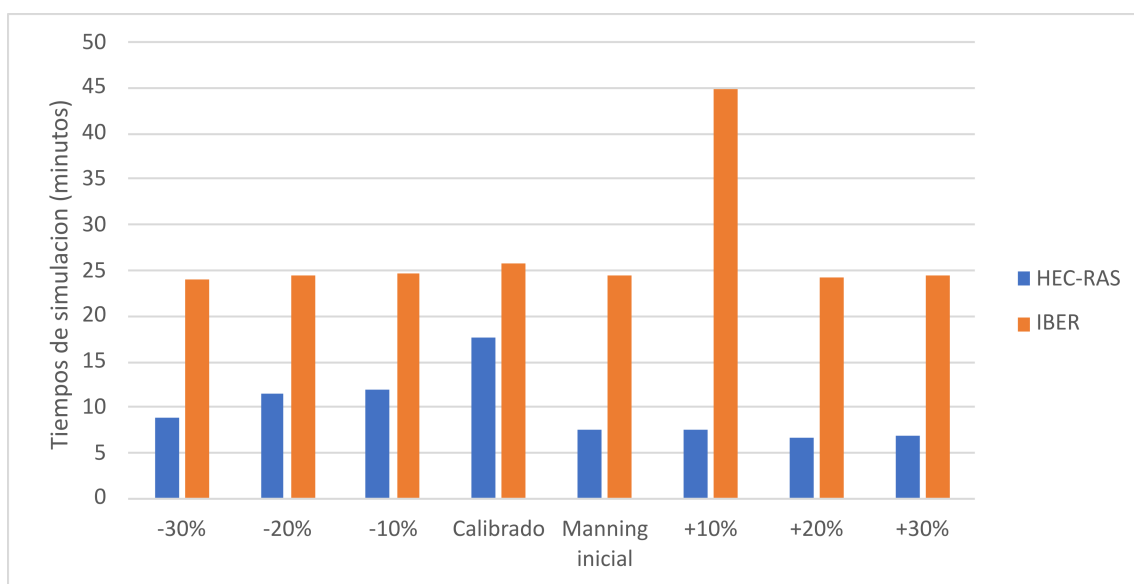


Figura 4: Resultados de los modelos calibrados

La comparación del diferencial de las cotas de inundación entre los resultados exportados de ambos modelos con un pixel de 0.5m, Figura 5, revela patrones distintos en diferentes regiones. Entre Paso Amca y el balneario, se observa que IBER simula una cota superior a HEC-RAS en un rango de 50 cm a 10 cm. Por otro lado, desde la salida del balneario hasta el Parque F.D Sarmiento, HEC-RAS mantiene una cota superior en el rango de 10 cm a 20 cm. En el área cercana al puente de San Martín, HEC-RAS muestra cotas superiores que oscilan entre 10 cm y 30 cm en comparación con IBER.



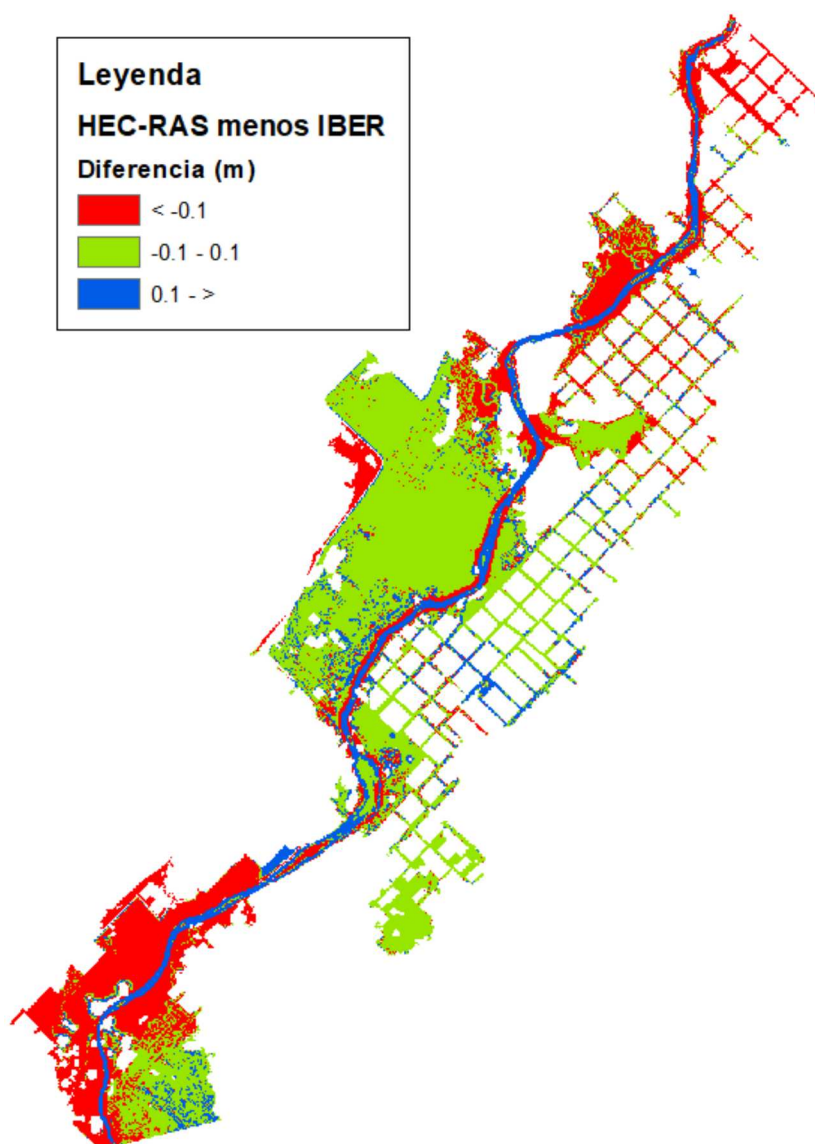


Figura 5: HEC-RAS menos IBERI.

### 3.4. RELEVAMIENTO TOPOGRÁFICO

## 4. CONCLUSIONES

Para el modelo en HEC-RAS, se evaluaron distintos escenarios con subgrillas de 15, 10 y 5 metros, con tiempos de ejecución de 7 minutos 35 segundos, 17 minutos 44 segundos y 2 horas 45 minutos y 33 segundos, respectivamente. Aunque se observaron ligeras mejoras en la precisión con valores de Jaccard de 0.747, 0.748 y 0.759, el aumento en la calidad no es significativo en relación al tiempo requerido para el cálculo. Esto destaca la importancia de considerar el índice de similaridad o de Jaccard al seleccionar la resolución de la subgrilla en modelos hidrodinámicos.

En el caso del modelo IBER, también se realizaron evaluaciones utilizando subgrillas de 15, 10 y 5 metros. Sin embargo, se observó que las subgrillas de 10 y 15 metros no generaban una triangulación lo suficientemente densa sobre las calles de la ciudad. Esto resultaba en un modelo que no era capaz de simular adecuadamente el flujo del caudal a través de la ciudad y,

en consecuencia, no representaba de manera precisa el fenómeno de inundación.

Por otro lado, al utilizar una subgrilla de 5 metros, se logró capturar una mayor cantidad de detalles topográficos y una geometría más precisa de las calles. Esto permitió una representación más realista del flujo del agua y una mejor reproducción de los eventos de inundación en la ciudad de Azul. Estos hallazgos destacan la importancia de seleccionar una resolución de subgrilla adecuada en el modelo IBER para garantizar una representación fiel del fenómeno de inundación en áreas urbanas. Además IBER al usar un esquema de resolución explícito, si no empleara un código paralelizado para GPU resultaría prohibitivo para este proyecto de integración del modelo hidrodinámico completo en un sistema de alerta temprana en tiempo real.

En general, el modelo hidrodinámico bidimensional brinda una herramienta confiable y precisa para comprender y predecir los patrones de inundación en la ciudad de Azul. Esto contribuye a la toma de decisiones informadas y a la implementación de medidas de mitigación y gestión de riesgos. Es crucial considerar la relación entre la precisión y el tiempo de cálculo al seleccionar los parámetros del modelo, asegurando un equilibrio adecuado entre la calidad de los resultados y la eficiencia computacional.

Para mejorar la modelación hidrodinámica en zonas urbanas ubicadas en áreas de llanura, se requiere realizar una calibración precisa utilizando improntas de inundación medidas. La calidad de la medición de estas improntas es fundamental, ya que influye directamente en la precisión y confiabilidad de los resultados del modelo.

## REFERENCIAS

- Antico P. y Sabbione N. Variabilidad temporal de la precipitación en la ciudad de la plata durante el período 1909-2007: tendencias y fluctuaciones cuasiperiódicas. 35:44–44, 2010.
- Cazenave I G. Inundación 18 de mayo de 2012 en la ciudad de azul. Informe Técnico, 2012.
- Ceballos A., Baró J., y Díaz C. Estimación de pérdidas económicas directas provocadas por inundación. aplicación de las curvas inundación-daños en países en desarrollo. *investigaciones geográficas*, 65:169–180, 2016. doi:<https://doi.org/10.14198/ingeo2016.65.10>.
- Hermelin M. *Desastres de Origen Natural en Colombia 1979–2004*, volumen II. Eafit, Ed., 2005.
- Hollis G. The effect of urbanization on floods of different recurrence interval. *AGU100*, páginas 431–435, 1975. doi:<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/WR011i003p00431>.
- LLulén W. y Blade E. Aplicación de la nueva herramienta hec-ras 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos. *IV jornada de Ingeniería del Agua*, 20:1–10, 2005.
- Peluso F., Usunoff E., y Bidegain A. Impacto económico de las inundaciones urbanas: caso de la ciudad de azul, provincia de buenos aires. vii jornadas pampeanas de ciencias naturales. vii jornadas pampeanas de ciencias naturales. páginas 269–278, 1999.
- Pfster L., Kwadijk J., y Musy A. Climate change, land use change and runoff prediction in the rhine–meuse basins. *Geoscience Data Journal*, 20:229–241, 2004. doi:<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/rra.775>.
- Pérez C. El mundo rural latinoamericano y la nueva ruralidad. 20:3180–193, 2004.
- Sanchez E. *Modelación precipitación escorrentía en cuencas urbanas-caso de estudio: Distrito de Carmen Alto*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional 2015San Cristóbal de Humanga, 2015.