



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

**Modelación hidrodinámica bidimensional bajo enfoques implícitos y explícitos
en áreas urbanas de zonas llanura a través de herramientas de uso libre y RPAS**

Crysthian David Sánchez Rodríguez

FICH

FACULTAD DE INGENIERIA
Y CIENCIAS HIDRICAS

Tesis de Maestría 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

**Modelación hidrodinámica bidimensional bajo enfoques implícitos y
explícitos en áreas urbanas de zonas llanura a través de
herramientas de uso libre y RPAS**

Crysthian David Sánchez Rodríguez

Tesis remitida al Comité Académico de la Maestría

como parte de los requisitos para obtener

el título de

MAGISTER EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

2025

Comisión de Posgrado, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Ciudad Universitaria,
Paraje “El Pozo”,
S3000, Santa Fe, Argentina



Modelación hidrodinámica bidimensional bajo enfoques implícitos y explícitos en áreas urbanas de zonas llanura a través de herramientas de uso libre y RPAS

Crysthian David Sánchez Rodríguez

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

Director

Dr. Ignacio Villanueva

Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA).

Co-director

Dr. Ing. Carlos César Scioli

**Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas –
Universidad Nacional del Litoral (FICH-UNL)**

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
2025

Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es el resultado de tareas de investigación originales y que no han sido presentadas para optar a un título de posgrado en ninguna otra Universidad o Institución.

Crysthian David Sánchez Rodríguez

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento al Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo Jorge Usunoff” (IHLLA) por el apoyo científico, económico y humano brindado durante el desarrollo de esta investigación. La generosidad de sus miembros, su espíritu colaborativo y su compromiso académico fueron fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos. En especial, quiero destacar la amistad y el acompañamiento de **Luis Vives** y **Georgina Casenave**, quienes con su calidez y profesionalismo enriquecieron profundamente esta experiencia.

Agradezco también al **Dr. Cristian Guevara**, cuya orientación técnica y acompañamiento cercano fueron claves en la estructuración, enfoque y desarrollo de este trabajo. Su guía me permitió crecer como investigador y comprender con mayor profundidad los desafíos de la modelación hidrodinámica en contextos reales.

Agradezco profundamente a mis directores de tesis, el Dr. **Carlos Scioli** y el Dr. **Ignacio Villanueva**, por su orientación constante, su rigurosidad académica y su generosa disposición a lo largo de todo este proceso. Su mirada crítica, su compromiso con la calidad científica y su confianza en mi trabajo fueron fundamentales para que esta investigación alcanzara la solidez y profundidad necesarias. Gracias por acompañarme con paciencia, por abrir espacios de diálogo y por alentar cada avance con profesionalismo y cercanía.

A mi esposa Tatiana y a mi hijo Santiago, que caminaron conmigo este sendero de agua, mapas y desvelos, les debo el rumor constante del mundo cuando todo parecía quieto. Ellos, guardianes de mi fe cuando el cansancio acechaba con su manto de sombra, estuvieron ahí: en cada silencio,

en cada comida olvidada, en cada tarde en que la ciencia se volvía un idioma difícil. Su amor no tuvo horario, ni tregua, ni frontera. Fueron brisa en el desierto y orilla segura cuando las mareas del estudio amenazaban con llevárselo todo.

A mi abuela Ana Tulia, que me crio con la sabiduría de quien conoce el idioma secreto de la tierra y los ojos del viento. Ella sembró en mí, sin saberlo, la raíz de quien soy hoy. Su voz, a veces suave, a veces tempestad, fue el primer mapa que aprendí a leer. En su casa —que olía a madera y a azahares— descubrí que el amor también se escribe en forma de esfuerzo y que los silencios de la infancia son un lenguaje poderoso que nos sigue hablando toda la vida.

A mis padres Ricardo y Esperanza, que fueron río y cauce, guía y espejo. Me llevaron de la mano hasta el borde del mundo conocido y, sin miedo, me soltaron para que encontrara mi propio camino. Ellos, que me enseñaron a observar el cielo sin perder de vista el barro de los caminos, siguen caminando conmigo, aun cuando ya no miramos hacia la misma estrella.

Y a todas aquellas personas que se cruzaron en este viaje —en Argentina y en Colombia—, gracias por los días compartidos, por las preguntas que abrían puertas y por las respuestas que encendían faroles. Gracias por el café conversado, por el silencio respetado, por la risa y la complicidad. Ustedes también son parte de estas páginas. Porque una tesis no se escribe solo con datos y fórmulas, sino también con gestos, afectos y pequeños milagros cotidianos que nos empujan a seguir cuando la razón se queda corta y solo el corazón entiende el mapa.

Resumen

Este estudio se enfoca en desarrollar y comparar metodologías para el análisis de inundaciones en áreas urbanas ubicadas en áreas de llanura, específicamente en la ciudad de Azul. El objetivo principal es establecer un modelo de pronóstico de inundaciones que pueda integrarse efectivamente en sistemas de alerta temprana. Para lograr esto, se evalúan y comparan dos modelos hidrodinámicos ampliamente utilizados: HEC-RAS e IBER.

El uso de drones equipados con tecnología de fotogrametría digital desempeña un papel crucial en este estudio. Estos dispositivos permiten la captura de datos detallados y precisos del terreno, incluyendo la topografía de la ciudad de Azul. Esta información es fundamental para la generación de un modelo predictivo de inundaciones que no solo sea preciso, sino también aplicable en la simulación de eventos extremos.

La metodología incluye la recopilación de datos mediante drones, seguida del procesamiento y análisis de imágenes utilizando técnicas avanzadas de fotogrametría digital. Este enfoque proporciona un modelo digital de terreno detallado con una resolución suficiente para la escala del estudio. La integración de este modelo con los modelos hidrodinámicos permite simular con precisión la propagación de inundaciones en diferentes escenarios, proporcionando información valiosa para la gestión y planificación urbana.

Los resultados obtenidos enfatizan la importancia crítica de la calidad de los datos utilizados en la calibración y validación de los modelos hidrodinámicos. La precisión de los modelos depende en

gran medida de la exactitud de los datos topográficos y de las condiciones de contorno proporcionadas. Además, se destaca la relevancia de este enfoque en la gestión de inundaciones y en la mejora de los sistemas de alerta temprana, permitiendo a las autoridades locales y regionales tomar decisiones informadas y rápidas frente a eventos hidrológicos extremos.

Abstract

This study focuses on the development and comparison of methodologies for flood analysis in urban areas located in flatland regions, specifically in the city of Azul. The main objective is to establish a flood forecasting model that can be effectively integrated into early warning systems. To achieve this, two widely used hydrodynamic models, HEC-RAS and IBER, are evaluated and compared.

The use of drones equipped with digital photogrammetry technology plays a crucial role in this study. These devices enable the capture of detailed and accurate terrain data, including the topography of the city of Azul. This information is fundamental for generating a predictive flood model that is not only precise but also applicable in extreme event simulations. The methodology includes data collection through drones, followed by image processing and analysis using advanced digital photogrammetry techniques. This approach provides a highly detailed digital terrain model with sufficient resolution for the study scale. The integration of this model with hydrodynamic models allows for accurate simulation of flood propagation under different scenarios, providing valuable information for urban planning and management.

The results emphasize the critical importance of data quality in the calibration and validation of hydrodynamic models. The accuracy of these models greatly depends on the precision of topographic data and boundary conditions provided. Additionally, this approach is highlighted as essential in flood management and the enhancement of early warning systems, allowing local and regional authorities to make informed and timely decisions in response to extreme hydrological events.

ÍNDICE

1. Introducción.....	20
2. Objetivos.....	26
2.1. Objetivo General.....	26
2.2. Objetivos específicos	26
3. Antecedentes.....	26
3.1. Modelación hidrodinámica	26
3.2. Modelos hidrodinámicos 2D.....	30
3.3. Modelo hidrodinámico IBER.....	31
3.4. Modelo hidrodinámico HEC-RAS.....	32
3.5. Topografía de precisión	33
4. Metodología.....	34
4.1. Área de estudio	34
4.2. Construcción del modelo topográfico.....	35
4.2.1. Relevamiento de puntos de foto-control.....	36
4.2.2. Planes de vuelo	37
4.2.3. Procesamiento fotogramétrico digital	38
4.2.4. Modelo digital del cauce.....	39
4.2.5. Relevamiento de puentes	40
4.3. Caracterización de la cobertura terrestre.....	41

4.4.	Hidrogramas de entrada	43
4.5.	Implementación del modelo HEC-RAS.....	45
4.6.	Implementación del modelo IBER.....	46
4.7.	Análisis de sensibilidad de n y de tamaño de celda	47
4.8.	Reconstrucción participativa de improntas de inundación	47
4.9.	Calibración y validación de los modelos.	48
5.	Resultados y discusión.....	48
5.1.	Construcción del modelo topográfico.....	49
5.1.1.	Procesamiento de imágenes aéreas	50
5.1.2.	Clasificación de nube de puntos	54
5.1.3.	Modelos digitales de terreno y de elevación.....	56
5.1.4.	Relevamiento de puentes.	57
5.1.5.	Batimetría.....	59
5.1.6.	Precisión del modelo digital de terreno	60
5.2.	Mapa de rugosidad.....	65
5.2.1.	Precisión de las clasificaciones supervisadas	65
5.2.2.	Resultados de la clasificación	67
5.3.	Modelos hidrodinámicos.....	70
5.3.1.	Implementación del modelo HEC-RAS.....	70
5.3.2.	Implementación del modelo IBER.....	75
5.3.3.	Análisis de sensibilidad.....	75
5.1.	Calibración.....	85

5.2. Comparación modelos	90
6. Conclusiones	96
6.1. Evaluación de modelos hidrodinámicos bidimensionales	96
6.2. Generación de base topográfica de alta precisión.....	96
6.3. Aporte al sistema de alerta temprana por inundaciones.....	97
6.4. Consideraciones metodológicas adicionales.....	98
6.5. Limitaciones y líneas futuras de investigación	98
7. Recomendaciones	99
8. Referencias bibliográficas.....	103
9. Anexos.	109
9.1. Secciones transversales de topografía.....	¡Error! Marcador no definido.
Firmas espectrales de clasificación supervisada	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Inundación de la ciudad de Azul del 26 de abril de 1980. Fuente Diario El Tiempo.	23
Figura 1-2 Inundación de la ciudad de Azul junio del 2001 Fuente: Diario El Tiempo.....	23
Figura 1-3 Inundación de la ciudad de Azul en el mes de mayo del 2012 Fuente: (Cazenave, 2012)	24
Figura 4-1 Localización del área de estudio	35
Figura 4-2 Diagrama de flujo metodológico seguido para la obtención de información topográfica a partir de fotogrametría digital e información obtenida con RPAS	36
Figura 4-3 Localización de puntos de foto-control.....	37
Figura 4-4 Par estereoscópico.....	38
Figura 4-5 Secciones transversales de batimetría	40
Figura 4-6 Puntos clasificados para archivo de entrenamiento	42
Figura 4-7 Diagrama de flujo clasificación supervisada de ortofoto.....	43
Figura 4-8 Diagrama de flujo clasificación de imagen satelital	43
Figura 4-9 Hidrograma e hietograma de mayo 2012	44
Figura 5-1 Modelo digital compuesto.....	50
Figura 5-2 Nube de puntos y puntos de control puente San Martín	53
Figura 5-3 Nube de puntos y puntos de control puente Güemes	53
Figura 5-4 Nube de puntos y puntos de control puente Pellegrini.....	53
Figura 5-5 Nube de puntos y puntos de control puente Mitre	53
Figura 5-6 Nube de puntos clasificada en diversas clases.....	54
Figura 5-7 Nube de puntos clasificada como terreno.....	54
Figura 5-8 Nube de puntos sin clasificar.....	55

Figura 5-9 Nube de puntos clasificada como terreno, no terreno y ruido.....	55
Figura 5-10 Nube de puntos clasificada en diversas clases del modelo fotogramétrico	56
Figura 5-11 Modelo digital de elevación y de terreno.....	57
Figura 5-12 Nube de puntos Puente Güemes.....	58
Figura 5-13 Nube de puntos Puente avenida Pellegrini.....	58
Figura 5-14 Nube de puntos Puente avenida San Martin	59
Figura 5-15 Nube de puntos puente Avenida Mitre.....	59
Figura 5-16 Perfil longitudinal arrollo del Azul.	59
Figura 5-17 Canal interpolado	60
Figura 5-18 Contraste de la altura medida con GPS vs altura obtenida del MDT.....	61
Figura 5-19 Distribución de errores del MDT generado	63
Figura 5-20 Batimetría medida vs batimetría interpolada	64
Figura 5-21 Clasificación de la ortofoto (a), imagen Sentinel-2 (b) y mapa del dominio generado (c)Mapa de rugosidad	69
Figura 5-22 Mapa de localización de zonas analizadas	71
Figura 5-23 Área de cálculo para HEC-RAS.....	72
Figura 5-24 Puente Güemes.....	72
Figura 5-25 Puente Pellegrini	73
Figura 5-26 Box lateral Puente San Martin	73
Figura 5-27 Puente San Martin.....	73
Figura 5-28 Puente Mitre	74
Figura 5-29 Malla no estructurada.....	75
Figura 5-30 Manning +10% Jaccard 0.67.....	78

Figura 5-31 Manning +20% Jaccard 0.69.....	78
Figura 5-32 Manning +30% Jaccard 0.71.....	78
Figura 5-33 Manning inicial% Jaccard 0.66.....	78
Figura 5-34 Manning -10% Jaccard0.66.....	79
Figura 5-35 Manning -20% Jaccard 0.65.....	79
Figura 5-36 Manning -30% Jaccard0.66.....	79
Figura 5-37 Sub Grilla de 15m Jaccard 0.747	81
Figura 5-38 Sub grilla de 10m Jaccard 0.748	81
Figura 5-39 Sub grilla de 5m Jaccard 0.759	82
Figura 5-40 Manning +10% Jaccard 0.61.....	83
Figura 5-41 Manning +20% Jaccard 0.58.....	83
Figura 5-42 Manning +30% Jaccard 0.59.....	83
Figura 5-43 Manning inicial% 0.66.....	83
Figura 5-44 Manning -10% Jaccard 0.638.....	84
Figura 5-45 Manning -20% Jaccard 0.601.....	84
Figura 5-46 Manning -30% Jaccard 0.61.....	84
Figura 5-47 Clasificación modelo calibrado Jaccard 0.751	85
Figura 5-48 Alturas de inundación encuestadas	86
Figura 5-49 Alturas de inundación del modelo HEC-RAS en los puntos encuestados	87
Figura 5-50 Alturas de inundación del modelo IBER en los puntos encuestados	88
Figura 5-51 Comparación de alturas encuestadas con alturas obtenidas en modelos.....	89
Figura 5-52 Comparación diferencias de los modelos frente a la encuesta.....	90
Figura 5-53 Hidrograma de simulación.	91

Figura 5-54 Comparación de tiempos de ejecución de modelo IBER y HEC-RAS.....	92
Figura 5-55 Diferencia de cota de inundación HEC-RAS menos IBER	94
Figura 5-56 Histograma de diferencias de altura entre los modelos (HEC-RAS – IBER).....	95
Figura 9-1 Plantilla explícita.....	116
Figura 9-2 Plantilla implícita de Crank-Nicolson.....	117
Figura 9-3 Perfiles topográficos.....	119
Figura 9-4 Perfil B-B’	120
Figura 9-5 Perfil C-C’	120
Figura 9-6 Perfil D-D’	120
Figura 9-7 Perfil E-E’	120
Figura 9-8 Perfil F-F’	121
Figura 9-9 Perfil G-G’	121
Figura 9-10 Perfil H-H’	121
Figura 9-11 Perfil I-I’	121
Figura 9-12 Perfil J-J’	122
Figura 9-13 Firma espectral suelo desnudo	125
Figura 9-14 Firma espectral concreto	126
Figura 9-15 Firma espectral pastos	126
Figura 9-16 Firma espectral Bosques	126
Figura 9-17 firma espectral suelo desnudo	127

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1 Modelos hidrodinámicos	28
Tabla 3-2 Softwares fotogramétricos.....	33
Tabla 4-1 Puntos de entrenamiento para el ortofotomosaico.....	41
Tabla 4-2 Puntos de entrenamiento para imágenes Sentinel	42
Tabla 5-1 Parámetros del plan de vuelo.....	51
Tabla 5-2 Disposición espacial de puntos de control.....	52
Tabla 5-3 Constante para z.	66
Tabla 5-4 Matriz de confusión Ortofoto	67
Tabla 5-5 Matriz de confusión imagen Sentinel 2	67
Tabla 5-6 Rango de variación del coeficiente Manning para los usos de suelo existentes	76
Tabla 5-7 Sensibilidad de rugosidad para sub grilla HEC-RAS de 15m.....	77
Tabla 5-8 Valores de Manning calibrados	80
Tabla 5-9 Tiempos de cálculo para diferentes tamaños de malla	81
Tabla 5-10 Sensibilidad de rugosidad para grilla flexible IBER de 5-10m.....	82
Tabla 5-11 Características computacionales.....	92

1. Introducción.

Los fenómenos de inundación constituyen uno de los desastres naturales más recurrentes y peligrosos a nivel mundial, con impactos socioeconómicos significativos tanto a escala local como global (Pérez, 2004; Bárcena et al., 2014). Históricamente, se han registrado eventos de gran magnitud, como las inundaciones ocurridas en China en 1887, asociadas a las crecidas de los ríos Yangtsé y Amarillo, que ocasionaron la muerte de millones de personas, así como el evento de Bangladesh en 1988, donde aproximadamente 30 millones de habitantes resultaron afectados (Hermelin, 2005). En años recientes, Europa ha experimentado episodios de inundación de carácter extremo que han renovado la atención sobre esta problemática, destacándose las inundaciones en Alemania en 2021, particularmente en la cuenca del río Ahr, que provocaron más de 180 víctimas fatales y cuantiosas pérdidas económicas, y los eventos registrados en la región de Valencia en 2024, asociados a precipitaciones intensas que generaron severos impactos en áreas urbanas e infraestructura crítica. Estos eventos evidencian la creciente vulnerabilidad de los sistemas urbanos frente a crecidas rápidas y la necesidad de contar con herramientas avanzadas de análisis y modelación hidrodinámica para la gestión del riesgo (IPCC, 2021; Kreienkamp et al., 2021).

De igual manera, el continente americano ha experimentado recurrentes situaciones de excesos hídricos con consecuencias significativas. Históricamente, se destacan eventos como la inundación del río Mississippi en Estados Unidos en 1973, donde se registró un caudal pico cercano a 24.100 m³/s y se generaron pérdidas económicas del orden de USD 1.100 millones (Belt, 1975). No obstante, en las últimas décadas la recurrencia y magnitud de estos eventos se ha intensificado. En Estados Unidos, las inundaciones asociadas a huracanes y precipitaciones extremas, como las registradas durante el huracán Harvey en 2017 y eventos recientes en la cuenca del Mississippi y sus afluentes, han ocasionado pérdidas económicas que superan decenas de miles de millones de dólares, consolidando a las inundaciones como el desastre natural de mayor impacto económico en el país (NOAA, 2021). En México, las inundaciones continúan representando una amenaza significativa, con eventos severos documentados en años recientes que han generado importantes afectaciones socioeconómicas, particularmente en zonas urbanas y periurbanas (CENAPRED, 2020). En Colombia, fenómenos hidroclimáticos extremos asociados a eventos La Niña, como los

ocurridos en 2010–2011 y más recientemente en 2021–2022, han producido impactos generalizados en infraestructura, vivienda y sistemas productivos, evidenciando la alta vulnerabilidad del territorio frente a inundaciones recurrentes (BID, 2012; IDEAM, 2022).

América Latina constituye una de las regiones más afectadas por inundaciones a nivel mundial, en gran medida debido a la elevada exposición de la población, las limitaciones en la planificación territorial y la reducida resiliencia frente a eventos hidrometeorológicos extremos (Bárcena et al., 2014; CEPAL, 2021). En Argentina, las inundaciones continúan siendo uno de los principales problemas ambientales y socioeconómicos, particularmente en regiones de llanura, donde los procesos de anegamiento suelen ser extensos y persistentes (Pereyra, 2004; Minotti et al., 2021). La provincia de Buenos Aires resulta especialmente vulnerable debido a la alta concentración poblacional y a la relevancia estratégica de sus actividades agropecuarias (INDEC, 2010). En esta provincia se han registrado impactos económicos significativos asociados a fenómenos de inundación, como los ocurridos en 2012, cuando aproximadamente 140.000 km² resultaron afectados, generando pérdidas estimadas en USD 3.400 millones, equivalentes a cerca del 0,7 % del producto interno bruto nacional (Antico y Sabbione, 2010; Kuppel et al., 2015; Ojea, 2014). Estudios recientes destacan que, en zonas de llanura como las de la provincia de Buenos Aires, las inundaciones provocan pérdidas socioeconómicas significativas debido al escurrimiento laminar, la acumulación prolongada del agua sobre grandes extensiones y la elevada aptitud productiva del territorio (Ceballos et al., 2016; Minotti et al., 2021). Asimismo, la ocurrencia de precipitaciones extremas, el ascenso de los niveles freáticos hasta cercanías de la superficie, las bajas pendientes topográficas y la limitada capacidad hidráulica de la red de drenaje configuran un escenario de alta vulnerabilidad frente a excesos hídricos, situación que ha sido documentada en investigaciones recientes (Guevara et al., 2019; IDEAM–INTA, 2022).

Durante las últimas cuatro décadas, la ciudad de Azul, ubicada en la provincia de Buenos Aires, ha enfrentado una problemática persistente asociada a la ocurrencia de inundaciones, vinculada tanto a factores naturales como antrópicos. Entre los principales condicionantes se destacan el incremento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos de precipitación en la región pampeana (Antico y Sabbione, 2010; IDEAM–INTA, 2022), el crecimiento urbano sin una adecuada planificación hidrológica (Hollis, 1975; Minotti et al., 2021), la progresiva

impermeabilización de superficies originalmente permeables (Sánchez, 2015) y los cambios en el uso del suelo rural asociados al avance de la frontera agropecuaria, que han reducido áreas de pasturas y forestaciones con capacidad de regulación hídrica (Pfister et al., 2004; Nosetto et al., 2020). A estos factores se suma un sistema de drenaje pluvial con capacidad limitada frente a crecidas extraordinarias.

El evento ocurrido en abril de 1980 (Figura 1-1) constituye uno de los antecedentes más significativos para la ciudad, dado que en el transcurso de una semana se registraron aproximadamente 477 mm de precipitación, provocando el anegamiento de cerca del 80 % de la superficie del partido y generando pérdidas económicas estimadas en 14.936 millones de pesos argentinos (Peluso, Usunoff & Bidegain, 1999). Más recientemente, el evento de inundación registrado en mayo de 2012 evidenció nuevamente la alta vulnerabilidad urbana, afectando aproximadamente al 30 % de la población y a cerca de 80 manzanas de la ciudad de Azul (Cazenave, 2012; Figuras 1-2 y 1-3). Estudios posteriores y reportes técnicos recientes indican que, pese a diversas intervenciones estructurales y de gestión, la ciudad continúa presentando una elevada exposición al riesgo de inundación, especialmente frente a escenarios de precipitaciones intensas y concentradas en cortos períodos de tiempo (Minotti et al., 2021; CEPAL, 2021).



Figura 1-1 Inundación de la ciudad de Azul del 26 de abril de 1980. Fuente Diario El Tiempo



Figura 1-2 Inundación de la ciudad de Azul junio del 2001 Fuente: Diario El Tiempo



Figura 1-3 Inundación de la ciudad de Azul en el mes de mayo del 2012 Fuente: (Cazenave, 2012)

Los modelos hidrodinámicos constituyen una de las herramientas más utilizadas tanto por la comunidad científica como por gestores y tomadores de decisiones para evaluar, monitorear y mitigar el impacto de los excesos hídricos en áreas urbanas. Estos modelos permiten analizar patrones de flujo, velocidades, caudales, profundidades del agua y la dinámica espacial de las inundaciones, aspectos fundamentales para la gestión del riesgo hídrico y la planificación territorial. En particular, los modelos hidrodinámicos bidimensionales (2D) han demostrado una adecuada capacidad para representar la dinámica de flujos multidireccionales y de baja velocidad, típicos de inundaciones en áreas de llanura y entornos urbanos complejos (Lullén & Balde, 2005; Neal et al., 2021).

Las ecuaciones diferenciales de Saint-Venant para flujos bidimensionales no admiten una solución analítica exacta, por lo que su resolución requiere el empleo de métodos numéricos que permitan aproximar el comportamiento del flujo en las dimensiones de interés. En este marco, los softwares de modelación hidrodinámica adoptan principalmente dos enfoques de resolución: esquemas

explícitos e implícitos, los cuales introducen distintos supuestos y simplificaciones para garantizar la estabilidad y eficiencia computacional. Diversos estudios han demostrado que la elección del esquema numérico puede generar diferencias en los resultados simulados, particularmente en términos de velocidades, tirantes, impronta de inundación y vectores de flujo, especialmente en escenarios de topografía suave y flujos someros (Amarís Castro et al., 2015; Sanders et al., 2021).

Para capturar y predecir de manera efectiva la magnitud y la extensión de los eventos de inundación resulta indispensable contar con modelos precisos y confiables. En este sentido, la eficiencia computacional constituye un factor clave, especialmente en aplicaciones asociadas a sistemas de alerta temprana, donde se requiere una respuesta rápida y oportuna ante situaciones de riesgo. Estudios recientes destacan que la combinación de modelos hidrodinámicos bidimensionales con esquemas numéricos eficientes permite mejorar significativamente la capacidad de predicción y la utilidad operativa de los sistemas de alerta por inundaciones (Neal et al., 2021; Haces-García et al., 2023). Asimismo, la disponibilidad de modelos digitales del terreno (MDT) de alta resolución se reconoce como un insumo fundamental para la correcta parametrización de los patrones morfométricos, geomorfológicos y de las estructuras civiles presentes, los cuales ejercen un control directo sobre la dirección, velocidad y acumulación del flujo en áreas de llanura (Guevara et al., 2019; Schubert et al., 2022).

En la actualidad, el sistema de alerta temprana por inundaciones de la ciudad de Azul se apoya en metodologías simplificadas que no representan de manera integral la complejidad del comportamiento hidrodinámico del área urbana. La ausencia de un modelo hidrodinámico bidimensional limita la precisión de las predicciones y dificulta la anticipación y mitigación efectiva de los riesgos asociados a inundaciones. La implementación de un modelo 2D permitiría mejorar la comprensión de los procesos de propagación del agua en distintos sectores de la ciudad, facilitando la estimación de áreas potencialmente afectadas y de los niveles de agua esperados. De este modo, se fortalecería tanto la capacidad de respuesta ante eventos extremos como la planificación y gestión del riesgo a largo plazo. En este contexto, la presente investigación busca aportar al cierre de esta brecha de conocimiento y contribuir a la mejora del sistema de alerta temprana por inundaciones en la ciudad de Azul.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Mejorar las metodologías empleadas en el análisis de inundaciones en áreas urbanas ubicadas en zonas de llanura, que permita tener un modelo de pronóstico de inundaciones aplicable a un sistema de alerta temprana.

2.2. Objetivos específicos

- Evaluar el desempeño de dos modelos hidrodinámicos 2D para la simulación de inundaciones de alto impacto en la ciudad de Azul.
- Contribuir al mejoramiento de la topografía de la ciudad de Azul mediante la implementación de fotogrametría.
- Aportar a la optimización del sistema de alerta temprana por inundaciones de la ciudad de Azul con un modelo hidrodinámico 2D.

3. Antecedentes

3.1. Modelación hidrodinámica

Los modelos hidrodinámicos son un enfoque numérico que permiten representar y evaluar las dinámicas del movimiento del agua sobre planicies de inundación. Estos modelos pueden clasificarse en función en la cantidad de dimensiones para las cuales calculan el movimiento del agua. Hay modelos unidireccionales (1D), los cuales requieren de tiempos cortos de procesamiento y de una topografía de representada principalmente por secciones transversales. Estos modelos consideran únicamente la dirección predominante del flujo, haciéndolos ineficientes para el análisis de inundaciones en áreas de llanura (Rahimzadeh et. al, 2029) porque no considera la variabilidad espacial completa de la topografía y la geometría del terreno, lo que puede llevar a simplificaciones excesivas y a la subestimación de los efectos de inundación en zonas bajas y complejas. Por otra parte, los modelos hidrodinámicos bidimensionales (2D), representan de una manera más adecuada la realidad del flujo, al tener en cuenta el movimiento del fluido en el plano X,Y. Esto permite al modelo, evaluar escenarios de flujo no encauzado como inundaciones, ruptura

de presas, fenómenos costeros. Finalmente están los modelos hidrodinámicos tridimensionales (3D), los cuales presentan tiempos costos computacionales más altos; pero contemplan el movimiento de las partículas en los 3 ejes del plano cartesiano. Son utilizados principalmente para evaluar fenómenos de turbulencia, para analizar el transporte de sedimentos, remolinos en estructuras, así como también mezcla de contaminantes en el agua. Como tienen altos tiempos de procesamiento se implementan solo para pequeñas áreas o para representar ensayos de laboratorios.

Algunos de los modelos hidrodinámicos más utilizados en entornos profesionales y académicos se presentan en la Tabla 3-1. Dentro de estos modelos, los más usados en la actualidad son HEC-RAS e IBER, por ser de libre acceso, tener la capacidad de realizar simulaciones 2D.

Tabla 3-1 Modelos hidrodinámicos

MODELO	DIMENSIÓN	ESQUEMA NUMÉRICO	LICENCIA	INSTITUCIÓN
MIKE (MIKE 11 / 21 / 3)	1D-2D-3D	Implícito Explícito	/ Privativa	Danish Hydraulic Institute (DHI)
HEC-RAS	1D-2D (híbrido)	Implícito	Libre	US Army Corps of Engineers
IBER	2D	Explícito	Libre	GEAMA (Univ. de A Coruña), Flumen (UPC), CEDEX
TELEMAC- MASCARET	1D-2D-3D	Explícito	Libre	EDF – Électricité de France
IRIC	2D	Explícito	Libre	International River Interface Cooperative
CCHE2D-FLOW	2D	Implícito	Libre	National Center for Computational Hydroscience and Engineering
DELFT3D	2D-3D	Explícito	Libre	Deltares
HYDRO-BID FLOOD	2D	Explícito	Privativo	Inter-American Development Bank

En el estudio de Delgado (2016), se usó el modelo bidimensional HEC-RAS 1D y 2D, para representar el comportamiento hidráulico de un tramo del Río Llobergat, localizado entre Sant Joan Despí y Cornellà en Francia, concluyendo que las improntas de inundación entre ambos métodos presentan una diferencia de área del 20%, y diferencias hasta de 1 m en la profundidad del agua en algunos sectores, ajustándose mejor el modelo 2D

En un estudio realizado por Pinos y Timbe Pinos y Timbe (2019), se llevaron a cabo simulaciones y comparaciones entre los modelos HEC-RAS 2D e IBER 2D en un tramo del Río Santa Bárbara, ubicado en la provincia de Azuay al sur de Ecuador. Los resultados mostraron precisiones del 82% con el modelo IBER y del 78% con el modelo HEC-RAS en la reproducción de la huella de inundación observada.

Collazos et al. (2018), implementaron el modelo IBER para representar el evento de inundación de mayo del año 2012 en la ciudad de Azul, usando como insumo topográfico un MDT de resolución espacial de 1 m. el cual no fue validado con la impronta medida, por lo tanto, carece de estimación de precisión en la representación del evento.

La precisión de la topografía es un factor determinante en la exactitud de los modelos hidrodinámicos, ya que permite representar de manera más adecuada el movimiento multidireccional del flujo en zonas inundables situadas en áreas de llanura. Por esta razón, los modelos digitales de elevación (MDE) generados a partir de imágenes satelitales no son recomendados para este tipo de estudios. Guevara et al. (2019) concluyeron que los modelos de elevación como el STRM y ALOS PALSAR, sin ajustes previos, presentan errores en la cota de ± 4 metros.

El uso de fotogrametría digital con drones, toma cada vez más importancia en estudios hidrológicos y de inundación, debido a la versatilidad de los equipos, los bajos tiempos de toma de información, la resolución de los MDT y la obtención de ortofotos a bajos costos (Jaramillo Baltra y Padró García, 2020).

Para analizar el impacto de las inundaciones presentadas en el Río Javori ubicado en la República Checa Langhammer y Vacková (2018), emplearon el uso de RPAS para generar un MDT de resolución de 3cm y posteriormente lo emplearon como insumo de entrada en el modelo hidrodinámico bidimensional MIKE21 En este estudio encontraron que la inundación simulada represento la impronta de inundación con una precisión del 75%.

En el estudio de ,se implementó el modelo HEC-RAS 2D, para analizar el efecto de diferentes eventos de exceso hídrico generados para de distintos períodos de retorno en la ciudad de Bacau ubicada al nordeste de Rumania. En este estudio utilizaron un MDT obtenido mediante RPAS equipado con un sensor LIDAR, encontrando que para períodos de retorno superiores a los 25 años, los impactos de inundación abarcarían un área de 12.82 km² y afectarían a 3780 edificaciones.

Finalmente, Skrede et al. (2020), utilizó como insumo de entrada un MDT realizado a partir de fotogrametría digital al modelo HEC-RAS, para simular diferentes escenarios de inundación en la ciudad de Damsgardsallmenningen en Noruega e implementar diferentes posibles soluciones que permitan drenar el exceso hídrico al mar. Este estudio concluyo que, para inundaciones en áreas urbanas ubicadas en zonas de llanura, se requiere una topografía de resolución entre 0.1 y 0.2 metros de precisión y un mallado de cálculo de entre 0.2 y 2 metros.

Para la simulación hidrodinámica es importante definir de manera precisa los coeficientes de rugosidad, para esto se requiere generar un mapa de usos de suelo de alta precisión y resolución. el uso de clasificaciones supervisadas en ortofotos con resoluciones espaciales de alrededor de 20 cm, son un aporte de alta calidad para la asignación de los valores del coeficiente de Manning. Los algoritmos de clasificación supervisada basados en inteligencia artificial como Random Forest o Support Vector Machine, son usados con mayor frecuencia debido a su relativa facilidad de programar en diversos lenguajes de programación y plataformas de uso libre como Google Earth Engine. compararon los resultados obtenidos al implementar 3 métodos de clasificación supervisada (Random Forest, Support Vector Machine y K-Nearest Neighbor), en imágenes Sentinel 2, encontrando que la precisión de la clasificación fue de entre 90 y 95% siendo el método Random Forest el más eficiente.

3.2. Modelos hidrodinámicos 2D

Los modelos hidrodinámicos 2D utilizan dos tipos de enfoques para la obtención de aproximaciones numéricas de las ecuaciones diferenciales de Saint Venant; estos enfoques son implícitos y explícitos. El método explícito evalúa el estado del sistema en función de los valores de los nodos vecinos en el instante inmediatamente anterior, es decir, calcula el estado del sistema en el tiempo $T = n + 1$ en función del instante $T = n$, y específicamente en cada celda y en función de sus vecinos inmediatos $(i - 2, i - 1, i + 1, i + 2)$. Para preservar la estabilidad del método se requiere emplear pasos de integración pequeños, requiriendo una gran cantidad de iteraciones, por lo tanto, se requiere una alta capacidad computacional y tiempos de ejecución mayores que los enfoques implícitos. Por el otro lado los enfoques implícitos, resuelven la ecuación diferencial para el instante $T = n + 1$ en función de los instantes $T = n, n - 1, n - 2 \dots$,y

especialmente en función de sus vecinos próximos y no tan próximos requiriendo menores tiempos de ejecución y requisitos computacionales menores. Un claro ejemplo del uso de estos dos enfoques son los implementados en los modelos hidrodinámicos bidimensionales IBER y HEC-RAS, los cuales resuelven las ecuaciones diferenciales de Saint Venant mediante enfoques explícitos e implícitos respectivamente (Hodges y Madadi-kandjani, 2019).

3.3. Modelo hidrodinámico IBER

El modelo hidrodinámico IBER (Río en lengua Iberica) es una herramienta ampliamente utilizada en la modelización hidráulica de flujos en ríos, estuarios y áreas costeras. IBER utiliza un mallado no estructurado basado en volúmenes finitos (Anexo -3), lo que permite una mayor flexibilidad en la discretización del dominio. Este tipo de mallado se adapta mejor a la geometría irregular de los cauces fluviales y áreas costeras, lo que resulta en una representación más precisa del flujo.

En cuanto al método de resolución de ecuaciones, IBER emplea el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de Saint Venant (Anexos.-1). Esto implica discretizar el dominio en volúmenes finitos y resolver las ecuaciones de conservación de la masa y el momentum.

La versión IBER Plus incluye mejoras significativas en la eficiencia computacional y la estabilidad numérica. Entre las optimizaciones se encuentran algoritmos mejorados para el cálculo de la presión, la velocidad y la altura del agua, así como una gestión los eficiente de la memoria y el procesamiento paralelo. En resumen, el modelo hidrodinámico IBER se destaca por su capacidad para manejar geometrías complejas, su precisión en la representación del flujo y su eficiencia computacional, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para estudios hidráulicos en una amplia variedad de entornos fluviales y costeros (Anexo Anexos.-6).

El modelo hidrodinámico IBER emplea un método explícito para resolver las ecuaciones de Saint-Venant (Anexo -5). Este método implica calcular los valores de las variables en cada paso de

tiempo únicamente en función de los valores actuales, considerando los pasos de tiempo anteriores. Al utilizar un enfoque explícito, IBER además de analizar los flujos gradualmente variados puede estudiar las transiciones no graduales de flujo, incluyendo los resaltos hidráulicos o flujos transitorios generados por cambios bruscos de pendiente o de sección, porque usa un enfoque explícito. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el método explícito puede requerir pasos de tiempo más pequeños para mantener la estabilidad numérica en comparación con el método implícito. En resumen, IBER utiliza un enfoque explícito para resolver las ecuaciones de Saint-Venant, lo que lo hace adecuado para ciertos tipos de simulaciones hidrodinámicas y permite un cálculo eficiente del flujo de agua en sistemas fluviales y áreas inundables (Anexo -2).

3.4. Modelo hidrodinámico HEC-RAS

HEC-RAS es un modelo hidrodinámico ampliamente utilizado para el análisis de flujos en ríos, canales y sistemas de drenaje. En su versión 2D, HEC-RAS permite simular de manera detallada el comportamiento del agua en áreas inundables, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para la gestión de inundaciones y el diseño de infraestructuras hidráulicas (Anexos.-1).

Una de las características principales de HEC-RAS 2D es su capacidad para manejar mallas estructuradas y no estructuradas. Esto significa que el usuario puede elegir entre diferentes tipos de mallado según las necesidades específicas del estudio. Las mallas estructuradas, que dividen el dominio hidráulico en elementos de forma regular, son útiles para casos en los que se requiere una discretización uniforme del terreno. Por otro lado, las mallas no estructuradas permiten una mayor flexibilidad en la representación del terreno y son ideales para estudios que involucran geometrías complejas o detalladas.

HEC-RAS utiliza un método numérico implícito para resolver las ecuaciones de Saint-Venant (Anexo -5). Este enfoque computacional resuelve las ecuaciones de manera iterativa (Anexo Anexos.-6), lo que implica que calcula los valores de las variables en cada paso de tiempo considerando tanto los valores actuales como los anteriores.

3.5. Topografía de precisión

El uso de una topografía de precisión es un factor determinante para la precisión de los modelos hidrodinámicos, ya que permite representar de una manera más adecuada las zonas inundables en áreas de llanura, por esta razón el uso de modelos digitales de elevación (MDE) generados con satélite no son recomendados para estos estudios. Debido a la problemática anteriormente mencionada, el uso de aeronaves remotamente tripuladas (RPAS) para estudios hidrológicos e hidrodinámicos está tomando cada vez más relevancia (Jaramillo y García, 2020), debido a la versatilidad de estos vehículos para realizar relevamientos con sistemas de laser LIDAR o fotogrametría digital. Los RPAS son herramientas de tecnología de código abierto de bajo costo, debido a su facilidad para ser ensamblados y programados.

En este contexto, es importante destacar algunos de los modelos de software más utilizados para el cálculo de fotogrametría, los cuales se presentan en la Tabla 3-2. Estos programas desempeñan un papel fundamental en el procesamiento de datos recopilados por los RPAS, permitiendo la generación de modelos digitales de terreno detallados y ortofotomosaicos de alta resolución, que son fundamentales para los estudios hidrológicos y la evaluación de riesgos asociados a inundaciones.

Tabla 3-2 Softwares fotogramétricos

<i>Modelo</i>	<i>Tipo de código</i>	<i>desarrollador</i>
<i>Autodesk Recap</i>	Uso Privativo	Autodesk
<i>Aguisoft Metashape</i>	Uso Privativo	Aguisoft
<i>Pix4D Mapper</i>	Uso Privativo	Pix4D
<i>Global Mapper 22</i>	Uso Privativo	Blue Marble Geographics
<i>Open Drone Map</i>	Uso libre, código abierto	Opendronemap ORG
<i>Trimble Inpho</i>	Uso Privativo	Trimble

4. Metodología

En este capítulo, se describe la metodología empleada para lograr los objetivos de esta tesis. Esta se despliega en una secuencia lógica y estructurada que aborda los aspectos necesarios para el análisis hidrodinámico en el área de estudio. En primer lugar, se presenta el área de estudio. A continuación, se describen los detalles del relevamiento topográfico realizado, que permitió obtener el MDT de la región a modelar. Se exponen los parámetros de los planes de vuelo necesarios para la captura de imágenes aéreas y la generación de ortomosaicos. Se describen los pasos seguidos para la caracterización detallada de estructuras hidráulicas utilizando drones. Además, se describe la metodología empleada para la estimación del coeficiente de rugosidad de Manning (n), parámetro necesario para la implementación de los modelos IBER y HEC-RAS. Luego, se exponen metodología seguida para la implementación de los modelos. Finalmente, se describe la estrategia de calibración y análisis de sensibilidad empleados.

El coeficiente de rugosidad afecta directamente la velocidad del flujo y la altura del agua, influyendo en la calibración del modelo y en su precisión en la representación de eventos hidrológicos. Como norma general la rugosidad y la velocidad mantienen una relación inversamente proporcional, generando que los valores aumentados de rugosidad disminuyen la velocidad del flujo y esto genere una elevación de los tirantes.

4.1. Área de estudio

La zona de estudio se encuentra localizada, en el centro de la provincia de Buenos Aires (Figura 4-1) 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 encuentra comunicada con todo el país a través de las rutas nacionales N° 3 y 226, las rutas 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 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 aproximadamente 902 mm.

De acuerdo con (INDEC, 2010), el partido de Azul cuenta con una población censada para el año 2010 de 65.280 habitantes, concentrada fundamentalmente en la ciudad de Azul.



Figura 4-1 Localización del área de estudio

4.2. Construcción del modelo topográfico

El relevamiento topográfico debe realizarse mediante fotogrametría digital, utilizando un sensor óptico RGB montado sobre una RPAS, que permite obtener datos precisos y detallados del terreno con una alta resolución espacial. La fotogrametría digital basada en datos obtenidos con RPAS facilita la estimación de información geoespacial, como ortofotomosaicos y MDT. Estos productos cartográficos son fundamentales para diversas aplicaciones, como la planificación urbana, la gestión del territorio, la ingeniería civil y la gestión ambiental. El uso de RPAS proporciona flexibilidad y agilidad en la recolección de datos, permitiendo obtener información actualizada de manera rápida y segura. En la Figura 4-2 se ilustra el flujo metodológico seguido para obtener los productos topográficos, y en las secciones siguientes se presenta la descripción y detalles del procedimiento realizado.

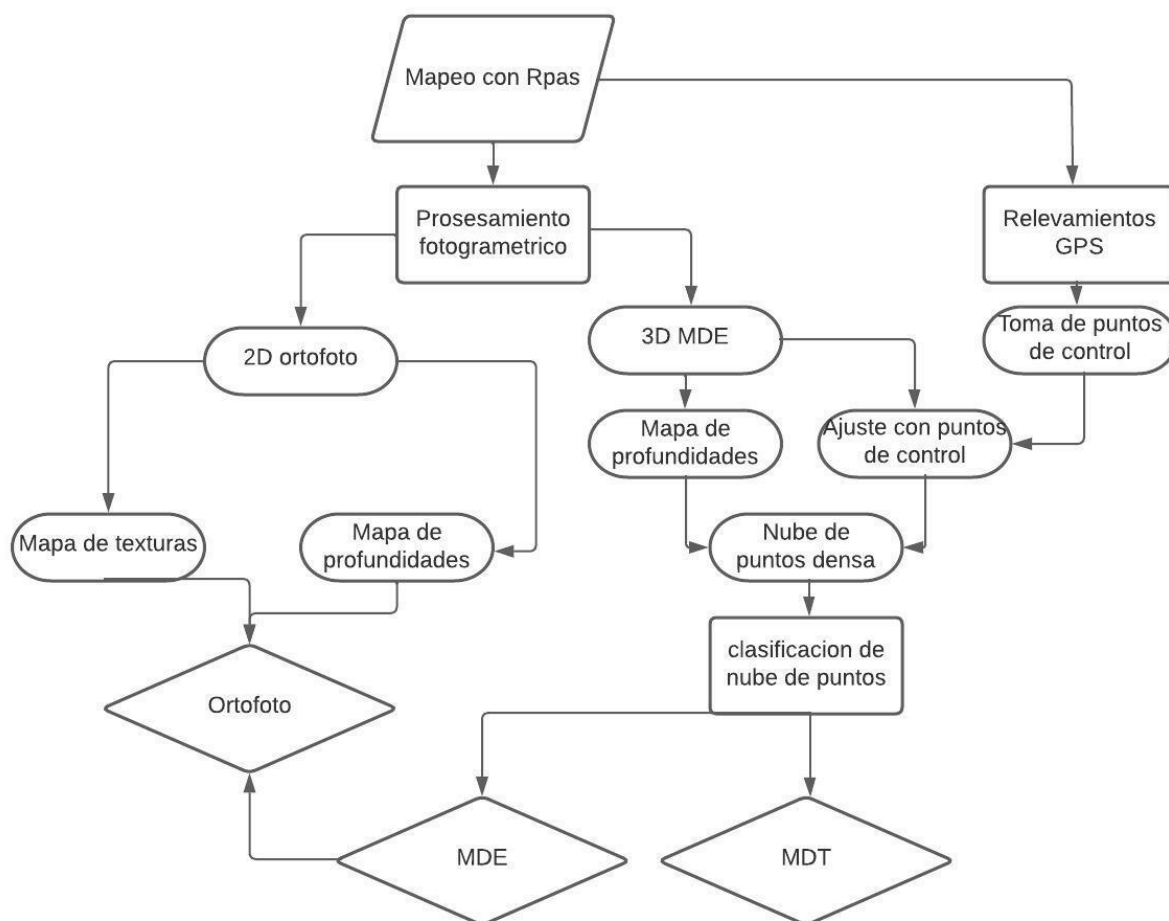


Figura 4-2 Diagrama de flujo metodológico seguido para la obtención de información topográfica a partir de fotogrametría digital e información obtenida con RPAS

4.2.1. Relevamiento de puntos de foto-control.

Para el ajuste de las coordenadas de las imágenes aéreas y la calibración de cámaras es necesario tomar puntos de fotocontrol tridimensional con GPS diferencial (Figura 4-3). El tiempo de rastreo de estos puntos fue de aproximadamente 15 minutos y se usó una altura de bastón constante de 2.75 m. El equipo utilizado fue ensamblado a partir de una tarjeta GPS ArduSimple RTK2B de tecnología de código abierto basada en arduino. El pos-proceso de los puntos se realizó con el modelo de código abierto rtklib (Rtklib, 2019), usando como base la estación de GPS activa del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de Azul. La corrección atmosférica y de posición de satélites se hizo con efemérides precisas, la confiabilidad de la señal se logró mediante la limpieza de

señales con tiempo de captura inferior a 3 minutos. Se utilizó el modelo geoidal GEOIDE-AR16 del IGN para calcular la altura ortométrica, el cual está disponible a través de su plataforma web.



Figura 4-3 Localización de puntos de foto-control

4.2.2. Planes de vuelo

Para el diseño de los 35 planes de vuelo, se utilizó la aplicación DRONE DEPLOY, la cual se ejecuta en la plataforma Android y permite la conexión con la tarjeta controladora de la aeronave. Esta aplicación facilita el diseño y ejecución de los planes de vuelo, así como el monitoreo de la actividad de la aeronave. Con el fin de optimizar el rendimiento de la batería de la aeronave, las misiones se diseñaron de acuerdo con la dirección del viento presente. La altura de vuelo empleada para el relevamiento fue de 70 m sobre el terreno, lo que resulta en un tamaño del pixel de aproximadamente 5cm. El traslape longitudinal y trasversal de las imágenes se encuentra en el rango entre 80% y 70% respectivamente (Figura 4-4).



Figura 4-4 Par estereoscópico.

4.2.3. Procesamiento fotogramétrico digital

La fotogrametría digital parte de las mismas ecuaciones de la fotogrametría clásica, que se basa en la distancia focal, la altura de vuelo y la distancia de paralaje para calcular la diferencia de nivel entre dos puntos. Para procesar las imágenes aéreas y generar la topografía, se debe puede implementar el software de fotogrametría digital OpenDronemap (OpenDoneMap, 2019). Una vez cargadas las imágenes obtenidas por RPAS y se genera una nube de puntos de baja densidad necesaria para localizar los puntos de foto-control tomados.

Tras identificar los puntos de fotocontrol, en cada una de las imágenes se debe asignar las coordenadas reales a cada uno. Esto junto con la identificación de puntos comunes y reconocibles en imágenes se logra un el ajuste geográfico, la auto-calibración de los lentes de cada fotografía y la corrección de los desfases por emparejamiento.

El procedimiento anterior permite generar una nube de alta. Esta información es básica para la generación del MDT. Con estos datos como base, se procede a generar varios modelos digitales. Estos modelos proporcionan una representación precisa de la superficie terrestre en el área de estudio. Además, se debe generar un modelo digital de terreno ajustado, que incluya información batimétrica u omisiones tales como las manzanas.

Para determinar los puntos que corresponden a vegetación baja, vegetación alta, estructuras, vías y autos, se ejecutó una función interna del programa de clasificación supervisada, la cual utiliza el método de clasificación de nubes de puntos de Ekhtari y Sahebi (2008). Esta metodología de clasificación utiliza un algoritmo en malla que identifica áreas de variación abrupta de pendiente, las cuales se asumen como fronteras entre una estructura y el suelo, posterior el algoritmo analiza las rugosidades y firmas espectrales de las porciones de puntos preclasificadas y las clasifica mediante inteligencia artificial con características preestablecidas.

La topografía fue reconstruida a partir de una nube de puntos de muy alta densidad (aproximadamente un punto cada 9 cm), lo que permitió generar el Modelo Digital del Terreno mediante interpolación lineal, evitando la necesidad de aplicar métodos geoestadísticos complejos. La técnica de IDW fue empleada exclusivamente para la especialización de los errores verticales, con el objetivo de analizar su distribución espacial y no para la interpolación del MDT.

4.2.4. Modelo digital del cauce

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 esto, fue necesario reconstruir el canal del arroyo del Azul, utilizando 19 secciones de batimetría relevadas por el instituto de hidrología de llanuras (Collazos, et. al, 2018; Figura 4-5). Estas secciones proporcionaron la base esencial para la reconstrucción del canal a lo largo del alineamiento del arroyo del Azul. El perfil longitudinal del canal se definió cuidadosamente siguiendo este alineamiento, considerando los puntos más bajos de cada sección transversal de batimetría para garantizar una representación precisa del lecho del arroyo.



Figura 4-5 Secciones transversales de batimetría

4.2.5. Relevamiento de puentes

Para obtener información de alta precisión de los puentes, se realizó un vuelo fotogramétrico con grilla cruzada y de contorno, a una altura de 50 m sobre el terreno y un traslape de 80% tanto longitudinal y como transversalmente. Así, se obtuvo una nube de puntos con una densidad de 250 puntos por metro cuadrado y un MDT con una resolución espacial horizontal de 1.5 cm, que se utilizó para la reconstrucción de la estructura, superficie y pilares de puentes. Como resultado, se generó un plano de cada puente que fue posteriormente implantado en cada uno de los modelos hidrodinámicos implementados.

4.3. Caracterización de la cobertura terrestre

A partir del relevamiento fotogramétrico y de una compilación de imágenes satelitales Sentinel 2 que permitió completar información en áreas que por problemas de acceso no pudieron incluirse en los planes de vuelo, se aplicó el algoritmo de clasificación supervisada Random Forest para obtener dos mapas de cobertura de suelo con cinco clases: pastos, concreto, suelo desnudo, bosques y canales. El mapa de cobertura obtenido de la clasificación de imágenes Sentinel 2 fue usado para complementar al obtenido del relevamiento fotogramétrico en regiones no relevadas (Anexo -7 y Anexo-8).

La clasificación del ortofotomosaico obtenido por medio de fotogrametría digital se realizó mediante la librería ARCPY de Python, siguiendo el flujo metodológico que se presenta en la Figura 4-6. El entrenamiento se realizó con base en las bandas RGB de la ortofoto y una banda adicional correspondiente a un índice topográfico normalizado. El conjunto total de puntos de entrenamiento consta de 278 (Tabla 4-1), identificados por medio de la interpretación visual de la ortofoto.

Tabla 4-1 Puntos de entrenamiento para el ortofotomosaico

<i>cobertura</i>	<i>Cantidad de puntos</i>
<i>Pastos</i>	50
<i>Concreto</i>	33
<i>Suelo desnudo</i>	25
<i>Arboles</i>	32
<i>Canal</i>	30

Por otra parte, la clasificación de las imágenes satelitales Sentinel 2 fue realizada en la plataforma Google Earth Engine, a partir del procesamiento de una colección de imágenes del periodo 08-2019 a 08-2020 con una nubosidad inferior al 10%. En la Figura 4-7 se muestran el flujo metodológico seguido en esta plataforma. La imagen Sentinel-2 clasificada corresponde a un promedio temporal del periodo. Las bandas utilizadas para la clasificación son las *B2,B3,B4,B8,NDVI,B11/B6*, junto con el NDVI medio del periodo. En la Tabla 4-2 y Figura 4-5 se

especifican el número total de puntos de entrenamiento y ubicación geográfica según el tipo de cobertura, estos fueron identificados por interpretación visual.

Tabla 4-2 Puntos de entrenamiento para imágenes Sentinel

<i>cobertura</i>	<i>Cantidad de puntos</i>
<i>Pastos</i>	46
<i>Concreto</i>	24
<i>Suelo desnudo</i>	21
<i>Arboles</i>	23
<i>Canal</i>	21

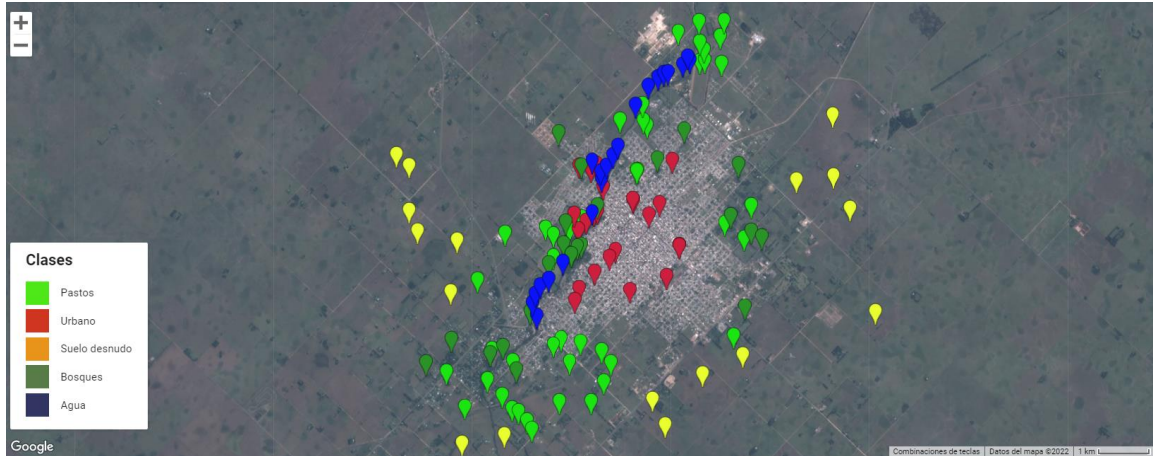


Figura 4-5 Puntos clasificados para archivo de entrenamiento

Finalmente, los mapas de cobertura obtenidos fueron combinados para la generación de un mosaico que abarca todo el dominio, que posteriormente fue ajustado a una resolución espacial de 1 m. Esta cobertura permitió definir el mapa de n requerido para implementación de los modelos, de acuerdo con los valores medios reportados en la literatura para cada tipo de cobertura.

La programación en Google Earth engine para las imágenes satelitales pueden contener un modelo de machine learning como randomforest usando la metodología descrita en la Figura 4-7, mientras tanto para la imagen obtenida por fotogrametría se debe usar una plataforma SIG que soporte librería Gdal y pueda seguir el flujo de trabajo descrito en la Figura 4-8.

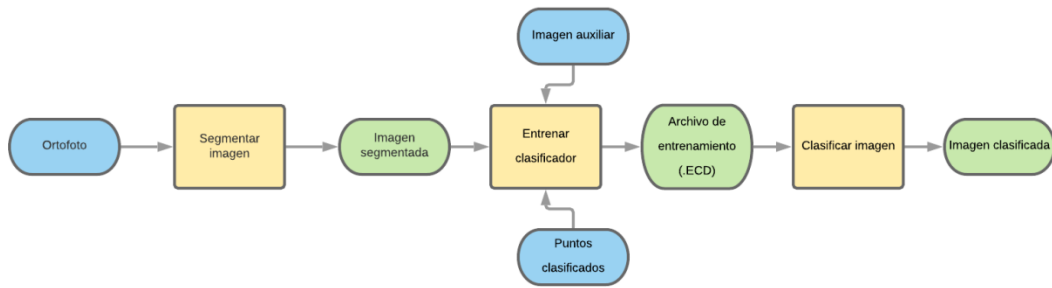


Figura 4-6 Diagrama de flujo clasificación supervisada de ortofoto.

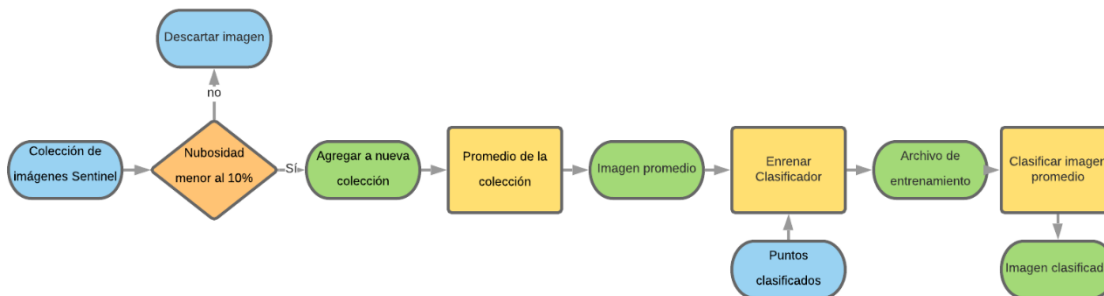


Figura 4-7 Diagrama de flujo clasificación de imagen satelital

4.4. Hidrogramas de entrada

Para la calibración de los modelos HEC-RAS e IBER se usó el hidrograma del evento acontecido en mayo del 2012 (Figura 4-8) medido en la estación de Seminario, aguas arriba de la ciudad de Azul, y el cual inicio el día 17 a las 16 horas y termino el 18 del mismo mes a las 23 horas, el caudal pico registrado fue de 286.19m³/s. De acuerdo con el escurrimiento superficial obtenido por el método de tiempo de base fijo, se encuentra que el escurrimiento directo fue de 46.32 hm³ y un caudal base de 4.60 m³/s. un hidrograma de 112 horas

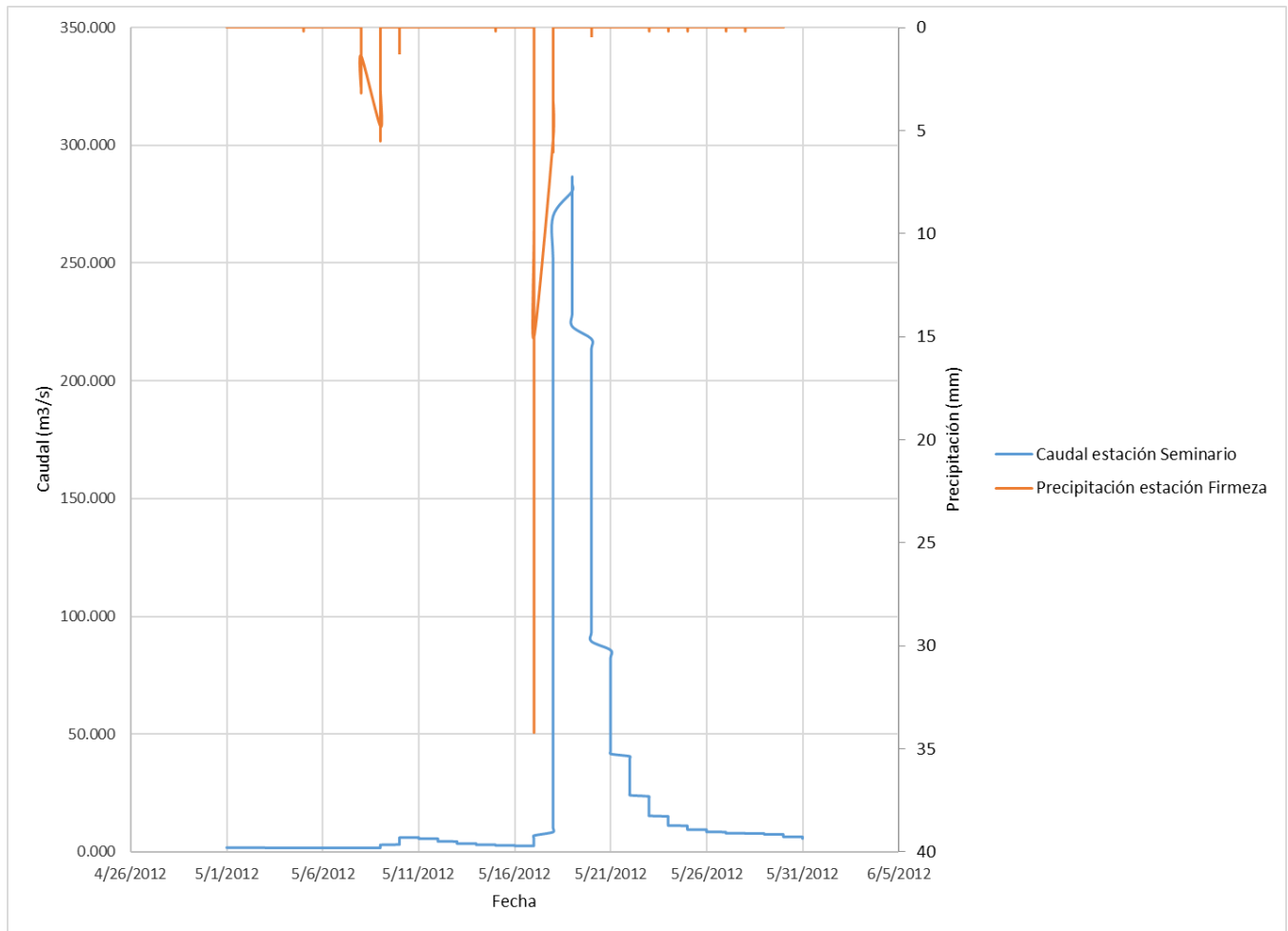


Figura 4-8 Hidrograma e hietograma de mayo 2012

4.1. Modelos hidrodinámicos

La modelación hidrodinámica desarrollada en este estudio se basa en el uso de modelos bidimensionales que resuelven las ecuaciones de Saint-Venant para flujos en superficie libre. A diferencia de enfoques simplificados basados en la aproximación de onda cinemática, el enfoque adoptado permite representar de manera más completa la dinámica del flujo en áreas de llanura, capturando efectos asociados a flujos multidireccionales, variaciones espaciales de tirante y velocidad.

4.1.1. Implementación del modelo HEC-RAS

Con el fin de mantener la estabilidad del modelo, la implementación se realiza por etapas en las que se va aumentando el nivel de complejidad tras la incorporación de estructuras hidráulicas y la distribución espacial del n . En cada etapa se cuantificaron los tiempos de cálculo demandados y el grado de precisión. En la primera etapa de la implementación, se usa la herramienta RAS-MAPER para incorporar el MDT mejorado con la batimetría y una sobre elevación de las estructuras para generar barreras físicas al flujo de la inundación en el modelo, sin incluir estructuras hidráulicas. Posteriormente, se delimita el dominio a modelar y se adopta la resolución espacial de las celdas igual a 15 m de lado, conformando una grilla 2D. La definición de la condición de contorno aguas arriba se basa en el hidrograma observado, mientras que se en la sección aguas abajo se usa el tirante normal, teniendo en cuenta la pendiente media del canal a lo largo del tramo analizado. Una vez cargados todos los insumos mínimos para ejecutar el modelo, se establece el paso de tiempo máximo para garantizar la estabilidad del cálculo (15 segundos) y se ejecuta el modelo con un n uniformemente distribuido igual.

En la segunda etapa de implementación, se incorporarán las estructuras hidráulicas más importantes al modelo. Estas actúan como una línea de corte que permite refinar el mallado en el área alterada por la estructura (Brunner, 2020). Se incorporaron cuatro estructuras hidráulicas: puente Mitre, puente Pelegrini, Puente San Martín y puente Güemes. En todos los casos, estas estructuras se modelaron como geometrías de puente con pilares, con un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Este valor se determinó considerando las superficies en contacto con el agua en la zona de la estructura. Además, se estableció una altura máxima de elevación de 0.5 m sobre la superficie de rodadura de cada puente.

El coeficiente de rugosidad afecta directamente la velocidad del flujo y la altura del agua, influyendo en la calibración del modelo y en su precisión en la representación de eventos hidrológicos.

En la etapa final, se consideró una distribución espacial del n de acuerdo con las clases de cobertura terrestre (sección 4.3), consolidadas en un modelo raster de 0.5 m de resolución espacial, que fue asociado a las celdas respectivas de la grilla. Los valores de n posteriormente fueron calibrados.

4.1.2. Implementación del modelo IBER

Para ejecutar el solucionador primitivo del modelo IBER es requerida la definición de la topografía, del mapa de rugosidades y de las condiciones de contorno. Para definir la topografía, se generó una malla no estructurada a través del plugin de QGIS GMSH (<https://plugins.qgis.org/plugins/gmsh/>) como se explica a continuación. Las estructuras hidráulicas se retiran del dominio para evitar que el modelo las reconociera como una zona de frontera. Luego, se determina el tamaño del elemento de grilla triangular adecuado para la generación de la malla y se asignó la cota a los vértices utilizando el MDT. 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. Para refinar áreas específicas del dominio, se emplearon braquelines (del inglés breaklines), los cuales son líneas que dividen el terreno en secciones más pequeñas. De esta manera, se logró generar una malla no estructurada que refleja la topografía del terreno.

Luego se incorporan las estructuras hidráulicas. En el modelo IBER, estas se modelan como condiciones de contorno internas (Bladé, E. et al., 2014), bajo cuatro posibles configuraciones: flujo bajo compuerta, flujo sobre vertedero en lámina libre, combinación de compuerta y vertedero y pérdida localizada. Los puentes incorporados, cuyas características geométricas fueron extraídas de las de los relevamientos a detalle de cada uno (sección 4.2.5) para el caso de los puentes la configuración usada es de flujo sobre vertedero de lámina libre.

Por otra parte, la rugosidad fue ingresada al modelo mediante la generación de un archivo con extensión .mat., de acuerdo con los valores de n establecidos en la sección 4.3 para cada tipo de cobertura. Finalmente, se emplearon las mismas condiciones de contorno consideradas en la implementación del modelo HEC-RAS.

IBER permite optimizar los cálculos usando los núcleos del GPU de la tarjeta gráfica, usando la herramienta IBER-PLUS,

IBER, ofrece la capacidad de optimizar los cálculos aprovechando los núcleos del procesador gráfico (GPU) a través de su herramienta IBER-PLUS (García, et al.). Esta característica es

especialmente relevante en la actualidad, dado el aumento en el poder de procesamiento de las tarjetas gráficas, que supera a menudo al de las unidades centrales de procesamiento (CPU). Al delegar parte de los cálculos al GPU, IBER puede mejorar significativamente su rendimiento y eficiencia computacional, lo que se traduce en tiempos de simulación más cortos y una mayor capacidad para manejar modelos más complejos y de mayor escala. Esta capacidad de optimización permite a los usuarios de IBER obtener resultados más rápidamente y explorar escenarios hidrodinámicos con mayor detalle y precisión. Además, el uso de la herramienta IBER-PLUS puede ayudar a reducir los costos computacionales asociados con la ejecución de simulaciones hidrodinámicas, lo que hace que el modelado sea más accesible para una amplia gama de usuarios, desde investigadores académicos hasta profesionales en el campo de la ingeniería hidráulica y la gestión del agua (Anexo Anexos.-6 Consideraciones sobre la optimización de velocidad de cálculo con HEC-RAS e IBER:Anexo Anexos.-6).

4.2. Análisis de sensibilidad de n y de tamaño de celda

Para analizar la sensibilidad del modelo hidrodinámico al n, los valores iniciales definidos en la sección 4.3 fueron modificados con incrementos y decrementos iguales al 10%, 20% y 30%. De esta manera, se evaluó el efecto del n en el comportamiento del flujo simulado. Este análisis es fundamental para determinar la robustez y confiabilidad del modelo hidrodinámico en diferentes escenarios.

Se evaluó la sensibilidad de los modelos al tamaño de la celda. En el caso de HEC-RAS, se evaluaron los tamaños de 15, 10 y 5 m. Esto permitió analizar cómo variaciones en la precisión del sub-grillado influyen en la representación de la inundación y las direcciones de flujo en el modelo hidrodinámico

4.3. Reconstrucción participativa de improntas de inundación

El relevamiento de improntas de inundación está afectado por imprecisiones en la medición, originadas por la dificultad de medición del nivel máximo de inundación, por la precisión de los equipos usados para registrar las coordenadas, la dificultad de acceso a áreas inundadas y demás problemas logísticos que se presentan en un evento de inundación. Por esto, a través de la realización de encuestas ciudadanas, se recopiló información adicional sobre la impronta de las

inundaciones de los años 2012, que fue usada para la calibración del modelo. Entre encuestas virtuales (por medio de la plataforma de Google) y visitas de campo.

4.4. Calibración y validación de los modelos.

Los modelos se calibraron con el evento de mayo de 2012. El último evento de inundación del 2012 no pudo ser usado para la validación debido a que no fue posible recabar información de su impronta o tirantes. Para determinar la precisión de la simulación y el desempeño del modelo, las alturas simuladas y registradas fueron usadas para calcular puntualmente el error medio cuadrático. Por otra parte, las improntas simuladas y registradas fueron comparadas para analizar la precisión espacial del modelo, se identificaron zonas de mayor ajuste, de sobreestimación y/o subestimación. Para determinar cuantitativamente el grado de ajuste entre la impronta simulada y la registrada, se calculó el índice de Jaccard o también llamado intersección sobre unión.

$$J(I_{mg}, S_I) = \frac{I_{mg} \cap S_I}{S_I \cup I_{mg}} = \frac{I_{mg} \cap S_I}{I_{mg} + S_I - (I_{mg} \cap S_I)} \text{Ecuación Metodología-1}$$

$$0 \leq J(I_{mg}, S_I) \leq 1 \text{Ecuación Metodología-2}$$

Donde:

$J(I_{mg}, S_I)$ es el índice de Jaccard.

I_{mg} imagen medida o impronta.

S_I imagen simulada.

El índice de Jaccard se emplea para medir la similitud entre dos conjuntos de datos y, en el contexto de la modelación hidrodinámica, se relaciona estrechamente con la precisión en la representación de la realidad. Cuanto mayor sea el porcentaje de acierto $J(I_{mg}, S_I)$ entre la impronta simulada y la registrada, mayor será el índice de Jaccard y, por ende, mayor será la precisión del modelo, el índice tiene un rango entre 0 y 1.

5. Resultados y discusión.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos tanto de la estimación de parámetros necesarios para la implementación de los modelos como de la calibración para del modelo,

siguiendo la misma secuencia en la que se presentó la metodología. En primer lugar, se presenta el MDT de alta precisión espacial. Posteriormente, se presentan los mapas de cobertura del suelo y el mapa de rugosidad asociado. Además, se implementaron y calibraron dos modelos hidrodinámicos bidimensionales para el evento del 17 de mayo de 2012, utilizando para la calibración y validación la impronta de inundación y encuestas realizadas a la población local con el fin de obtener las alturas de inundación. Se procedió a comparar el efecto espacio-temporal de las simulaciones sobre la representación de las improntas de inundación y las profundidades de agua en el área urbana de Azul.

Se ha agregado una nota metodológica explicando las limitaciones de los datos obtenidos, la posible presencia de sesgos y el nivel de confianza en los resultados.

5.1. Construcción del modelo topográfico.

En la Figura 5-1 se muestra el MDT ajustado, que combina una capa de estructuras de una altura genérica de 20 metros, que posibilita la representación de edificaciones y otras infraestructuras urbanas, junto con la batimetría y el modelo digital de terreno. Esta integración proporciona una representación completa y detallada del entorno, lo cual es fundamental para diversas aplicaciones, que incluyen la planificación urbana, la gestión de recursos hídricos y la evaluación de riesgos naturales. La mayor cantidad de edificaciones se encuentran al este del arroyo del Azul.



Figura 5-1 Modelo digital compuesto.

5.1.1. Procesamiento de imágenes aéreas

para este análisis fue necesario construir 5 modelos fotogramétricos, uno de la totalidad del dominio y cuatro correspondientes a los relevamientos específicos para cada uno de los puentes. Para construir el modelo de la ciudad de Azul se eliminaron imágenes que por condiciones climáticas presentaban una luminosidad baja. Las características de los plane de vuelo se presenta en la Tabla 5-1, para la calibración del modelo se usaron 127 puntos de control con coordenadas y 127 puntos de paso sin coordenadas (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**2), los puntos con coordenadas provienen de los puntos relevados en campo presentes en Figura 4-3 y la

Tabla 5-2 y el relevamiento desarrollado por el HILLA para el modelo de inundación desarrollado por (Collazos et al., 2018).

Tabla 5-1 Parámetros del plan de vuelo

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Numero de imágenes</i>	6908
<i>Altura de vuelo</i>	70m
<i>Tamaño de pixel</i>	9cm
<i>Área total relevada</i>	1500 Ha
<i>Error promedio</i>	0.758 píxel
<i>Densidad de puntos</i>	2300 puntos por metro cuadrado



Tabla 5-2 Disposición espacial de puntos de control.

<i>Nombre</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Altura elipsoidal</i>	<i>Altura optométrica</i>	<i>Conf_Altur</i>	<i>PDOP</i>	<i>N (m)</i>
<i>fc1</i>	-36.833966	-59.890459	163.87	146.558	0.104	1.8	17.312
<i>fc2</i>	-36.834027	-59.890339	164.371	147.059	0.188	1.8	17.312
<i>fc3</i>	-36.795997	-59.881624	157.322	140.035	0.087	1.7	17.287
<i>fc4</i>	-36.792116	-59.879784	153.69	136.406	0.03	1.7	17.284
<i>fc5</i>	-36.788658	-59.875851	153.491	136.21	0.085	1.7	17.281
<i>fc6</i>	-36.786203	-59.873005	152.37	135.092	0.092	1.7	17.278
<i>fc7</i>	-36.780172	-59.869211	152.303	135.03	0.086	1.9	17.273
<i>fc8</i>	-36.77371	-59.864357	150.738	133.471	0.164	1.8	17.267
<i>fc9</i>	-36.769799	-59.862512	150.289	133.025	0.187	1.8	17.264
<i>fc10</i>	-36.763916	-59.855152	148.868	131.611	0.21	2.1	17.257
<i>fc11</i>	-36.762629	-59.854079	147.987	130.731	0.168	1.8	17.256
<i>fc12</i>	-36.757446	-59.84766	146.656	129.406	0.123	3	17.25
<i>fc13</i>	-36.749911	-59.857333	146.288	129.041	0.106	2	17.247
<i>fc14</i>	-36.760929	-59.870388	133.827	116.568	0.19	1.4	17.259
<i>fc15</i>	-36.760598	-59.870311	130.527	113.268	0.22	1.4	17.259
<i>fc16</i>	-36.765145	-59.875483	149.193	131.929	0.34	1.5	17.264
<i>fc17</i>	-36.773569	-59.875956	151.097	133.827	0.103	1.9	17.27
<i>fc18</i>	-36.79524	-59.887931	155.7	138.412	0.32	2.7	17.288
<i>fc19</i>	-36.798798	-59.889608	154.76	137.47	0.413	2.7	17.29

Como se mencionó la sección 4.2.5 se realizaron 4 vuelos fotogramétricos específicos y los cuales abarcan los 4 puentes presentes en el área de estudio (Figura 5-2, Figura 5-3, Figura 5-4, Figura 5-5). Estos vuelos constaron entre 216 y 312 imágenes aéreas y se ajustó con 6 puntos de control tomados del modelo general,



Figura 5-2 Nube de puntos y puntos de control puente San Martín



Figura 5-3 Nube de puntos y puntos de control puente Güemes



Figura 5-4 Nube de puntos y puntos de control puente Pellegrini



Figura 5-5 Nube de puntos y puntos de control puente Mitre

5.1.2. Clasificación de nube de puntos

Se aplicaron 2 metodologías de clasificación de nubes de puntos, una enfocada en clasificación de terreno y otra enfocada en clasificación en diferentes clases. En el modelo general, se partió de la clasificación de terreno y se refinó teniendo en cuenta la clasificación de clases para corregir de manera manual y asistida las imprecisiones del método de clasificación. Estos resultados se presentan en Figura 5-6, Figura 5-7, Figura 5-8, Figura 5-9, Figura 5-10.

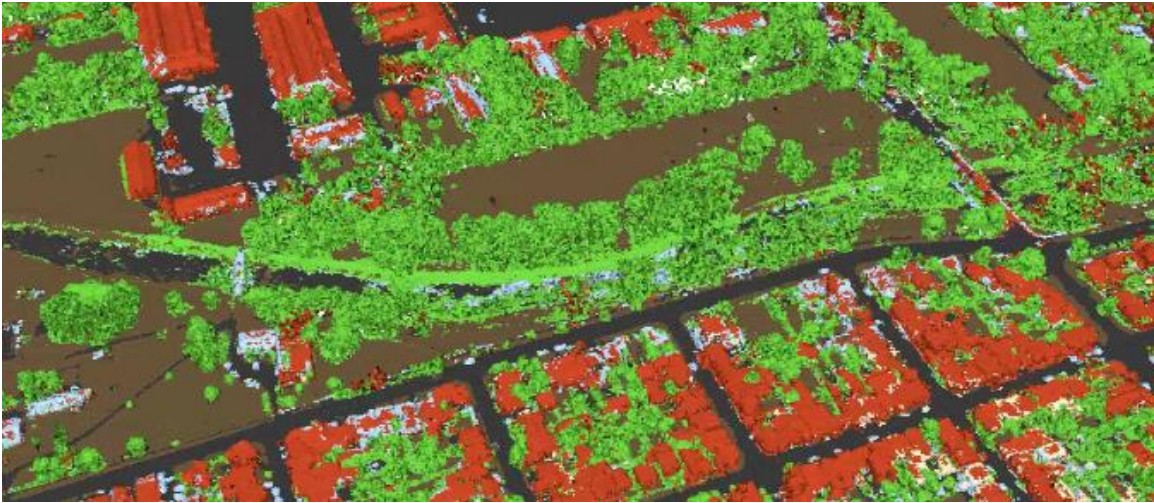


Figura 5-6 Nube de puntos clasificada en diversas clases.

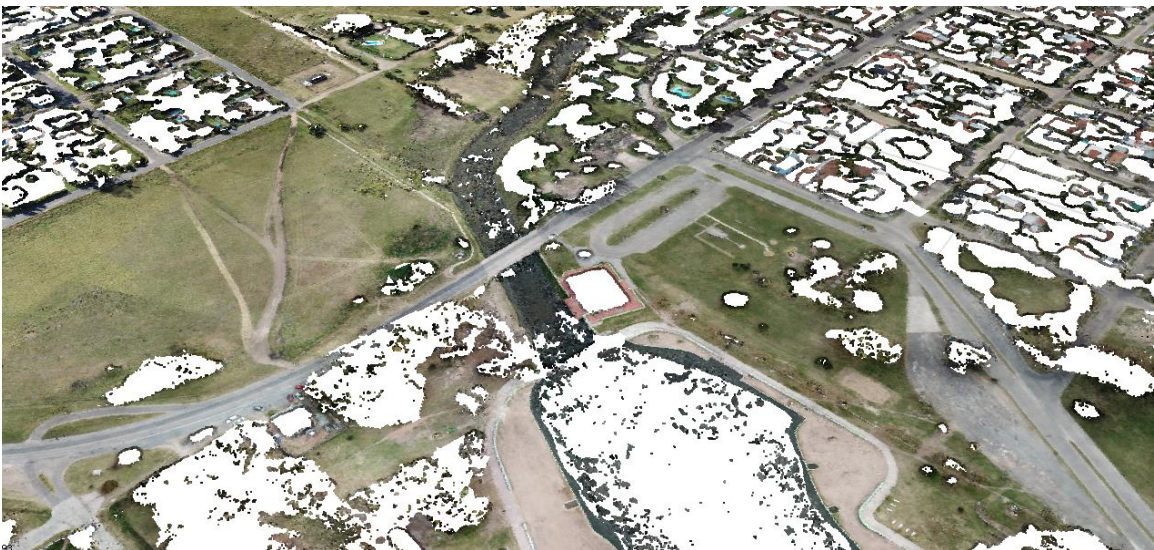


Figura 5-7 Nube de puntos clasificada como terreno.



Figura 5-8 Nube de puntos sin clasificar.

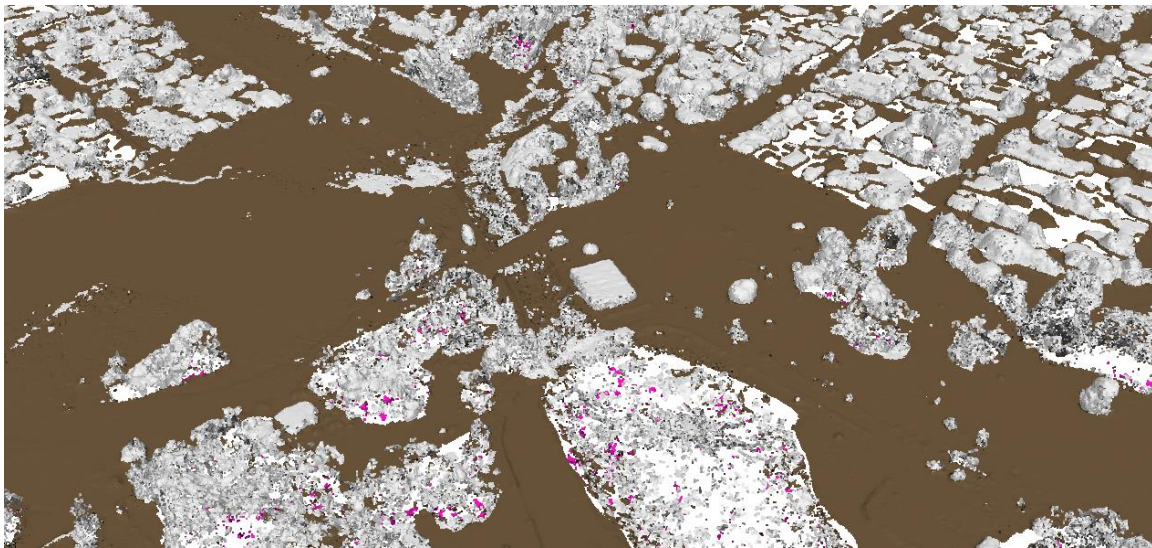


Figura 5-9 Nube de puntos clasificada como terreno, no terreno y ruido.

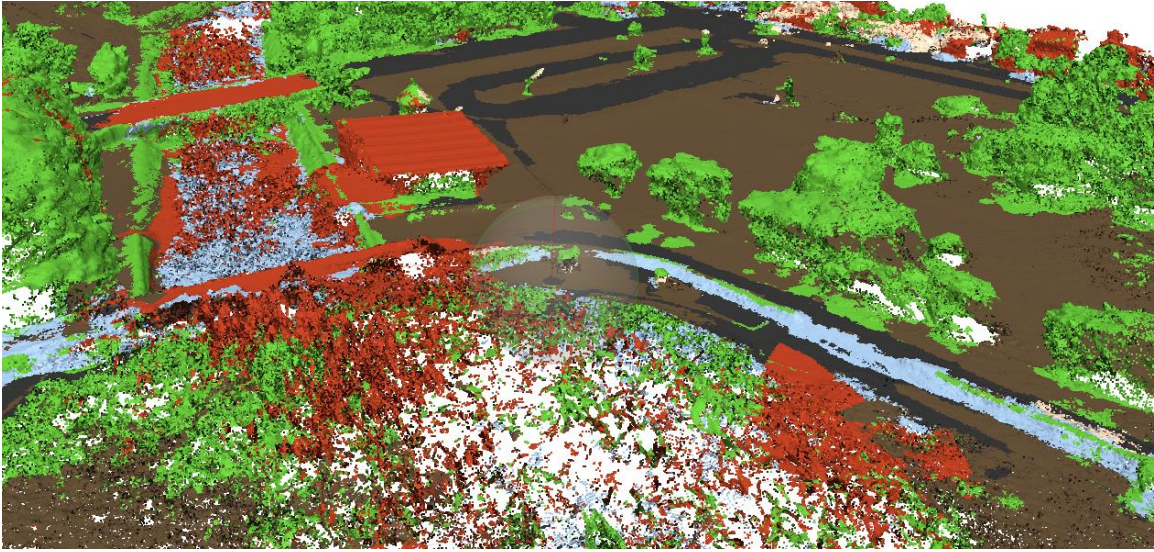
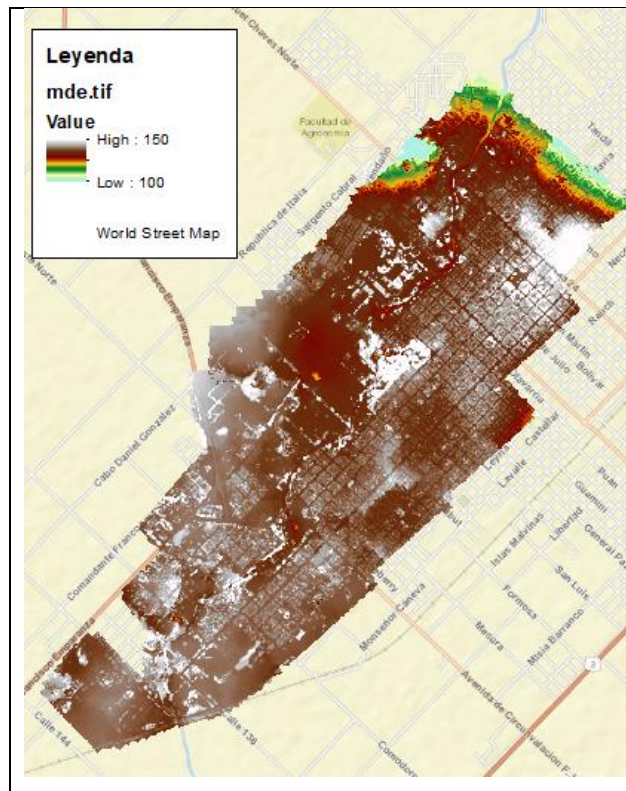


Figura 5-10 Nube de puntos clasificada en diversas clases del modelo fotogramétrico

5.1.3. Modelos digitales de terreno y de elevación

En la Figura 5-11 se presenta el MDT y MDE , que presentan una extensión de 1015 hectáreas y un tamaño de píxel de 0.3 m.



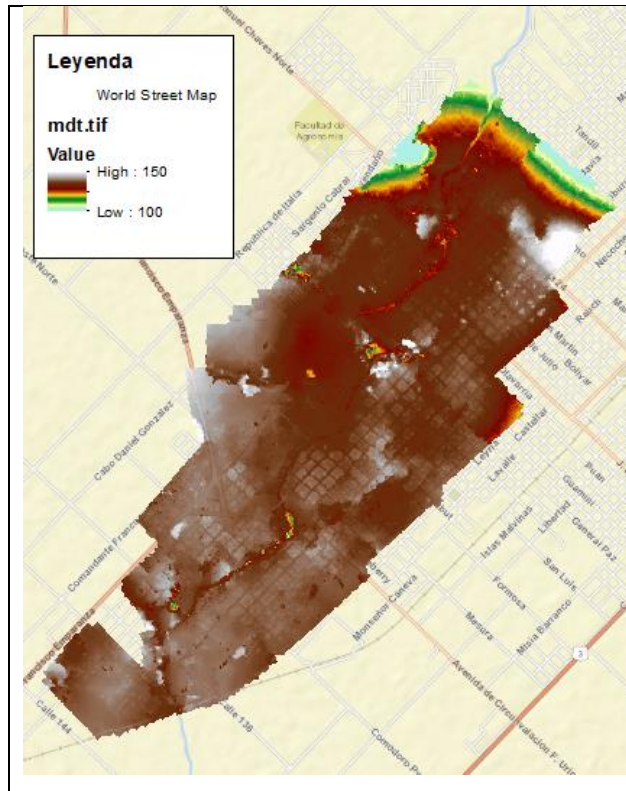


Figura 5-11 Modelo digital de elevación y de terreno

5.1.4. Relevamiento de puentes.

En las Figuras 5.12 a 5.15 se presentan los relevamientos fotogramétricos a detalle de cada uno de los puentes modelados, a partir de los cuales se obtuvieron medidas geométricas como la longitudinal del puente, la cota rasante de la superficie de rodadura, el ancho de las columnas, la altura de la estructura de rodadura y soporte del puente.

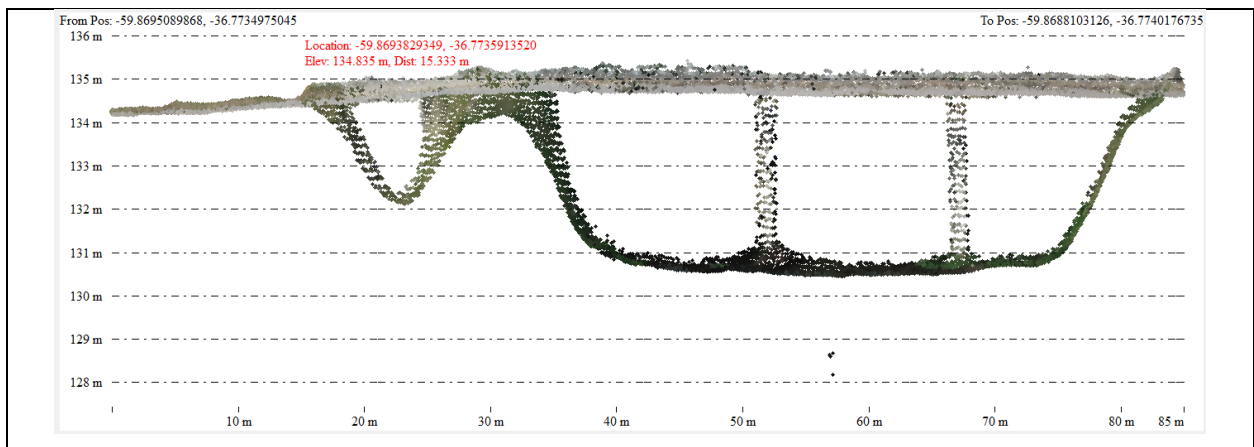
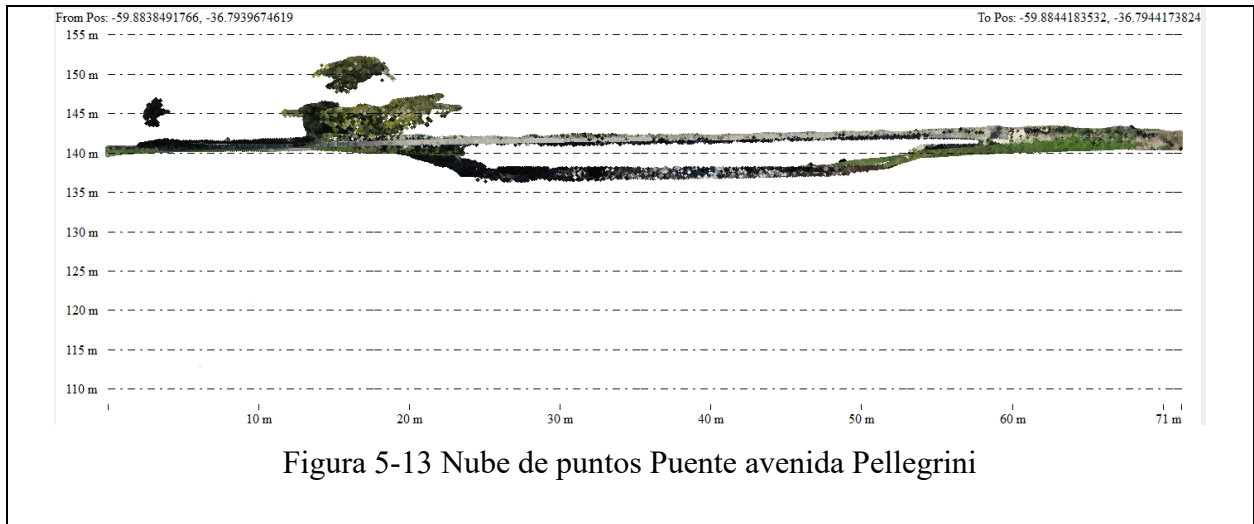
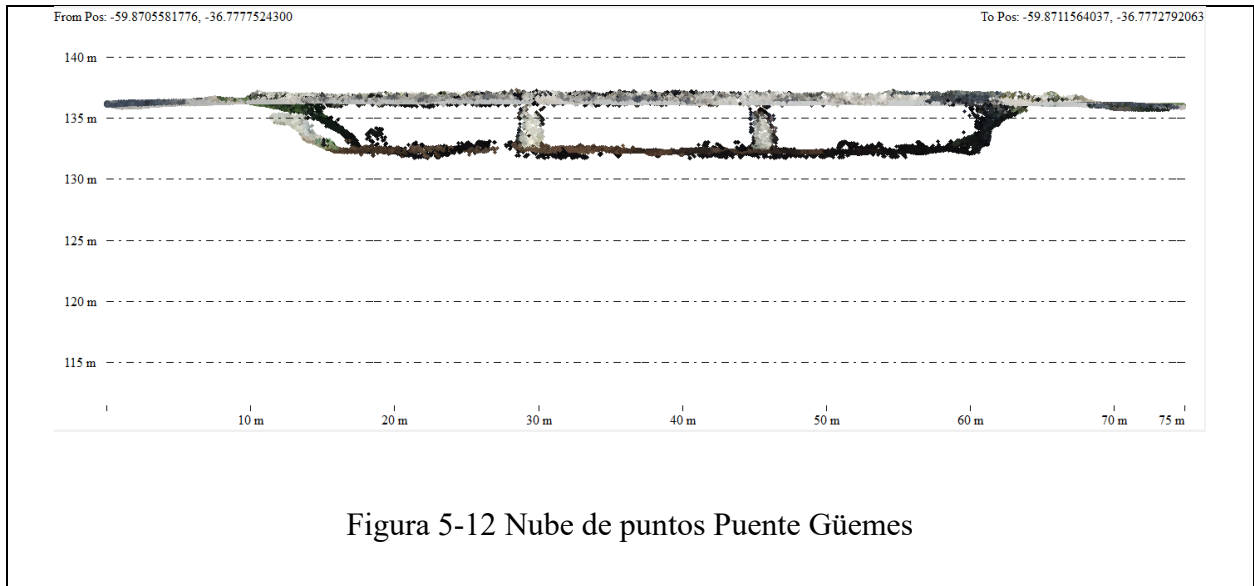
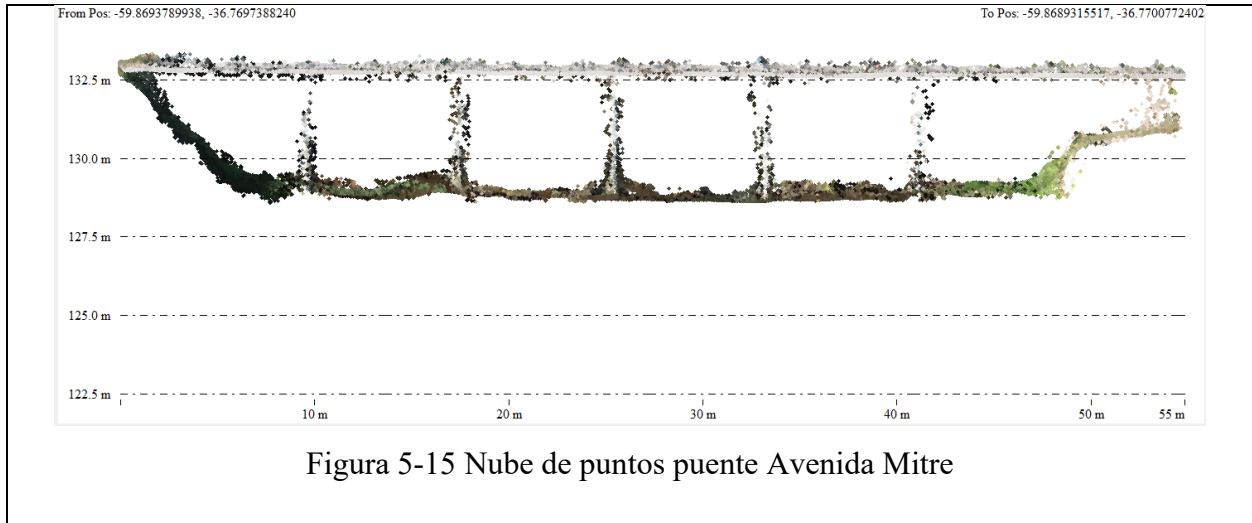


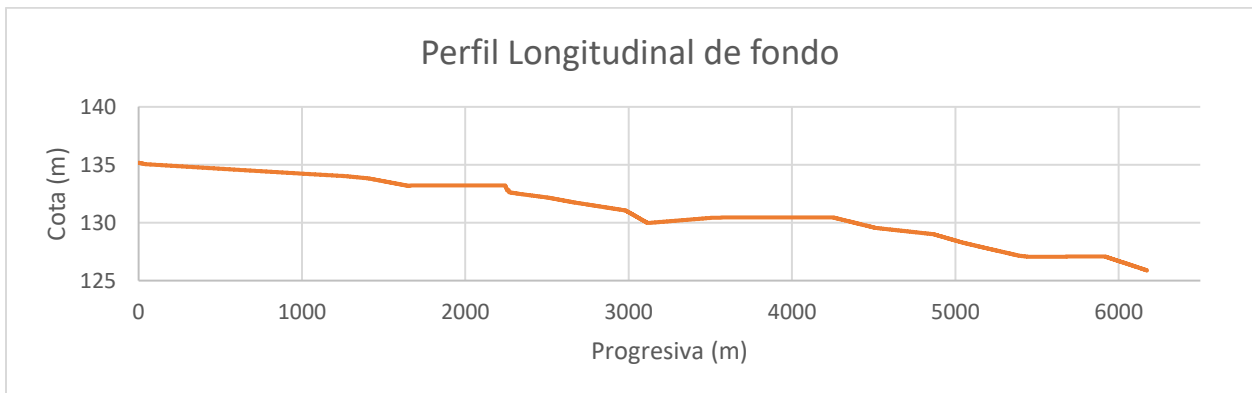
Figura 5-14 Nube de puntos Puente avenida San Martin



5.1.5. Batimetría.

El canal del Arroyo del Azul, tiene una longitud de 6.2 km y una elevación comprendida entre 135 y 125m.s.n.m (Figura 5-16, Figura 5-17)

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., iniciando al sur en el paso de la vía Los Álamos y terminando al norte a la altura de la avenida Malere. La Figura 5-16 representa el modelo digital del canal reconstruido.



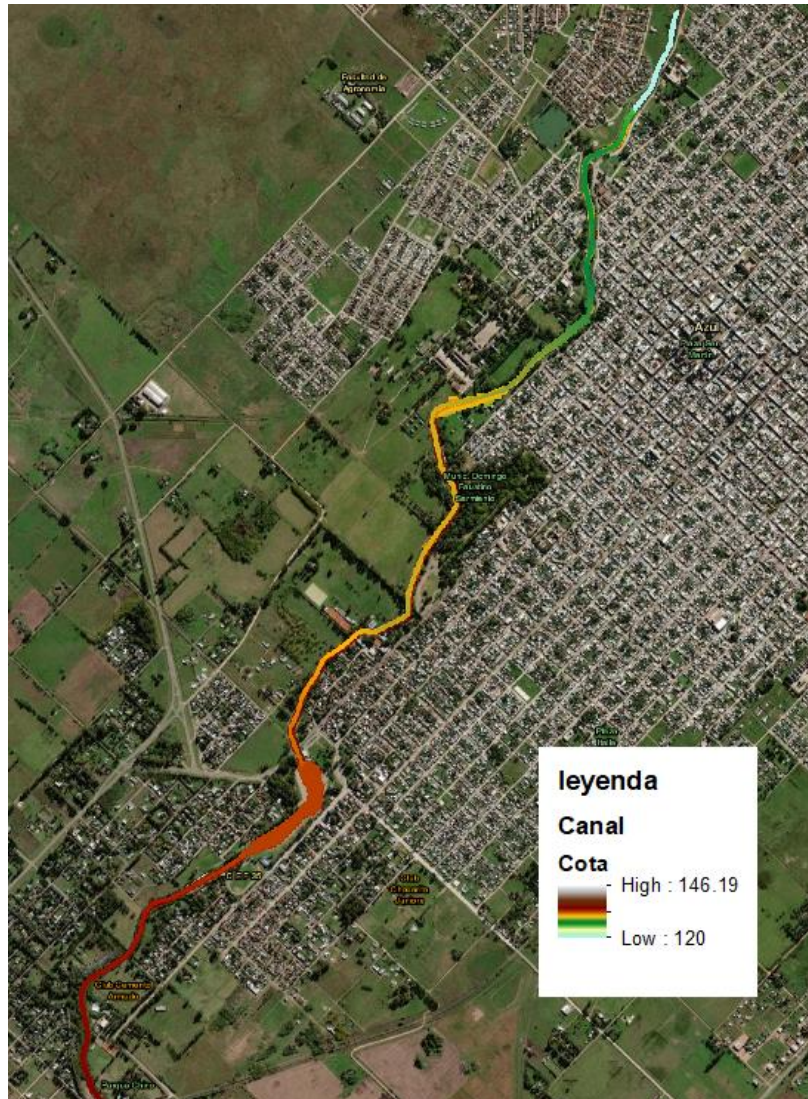


Figura 5-16 Canal interpolado

5.1.6. Precisión del modelo digital de terreno

La validación del MDT se realizó con 568 puntos de GPS distribuidos por el área de estudio, se usaron 2 estadísticos para calcular las incertidumbres: El coeficiente de determinación (R^2) (Ecuación Resultados y discusión.-3) y la raíz del error medio cuadrado (RMSE) (Ecuación Resultados y discusión.-4) .

$$R^2 = \frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_x^2 \sigma_y^2}$$

Ecuación Resultados y discusión.-3 Coeficiente de determinación

Donde σ_{xy}^2 es la covarianza y $\sigma_x^2\sigma_y^2$ son la varianza de los datos en los ejes “x” y “y” respectivamente.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

Ecuación Resultados y discusión.-4 RMSE

Donde “ \hat{y} ” corresponde a los valores simulados, “y” corresponde a los valores observados y nes el número total de datos.

En la Figura 5-17 se muestra la dispersión entre las cotas del MDT ajustado y las cotas obtenidas con el GPS diferencia. El coeficiente de correlación obtenido es de de 0.985, lo que demuestra un ajuste adecuado entre los valores modelados y los observados. El RMSE fue de 29.6 cm, lo que indica que que las incertidumbres del MDT son considerablemente bajas. Es relevante destacar que la incertidumbre de los datos estimados mediante GPS fue inferior a 30 centímetros en promedio.

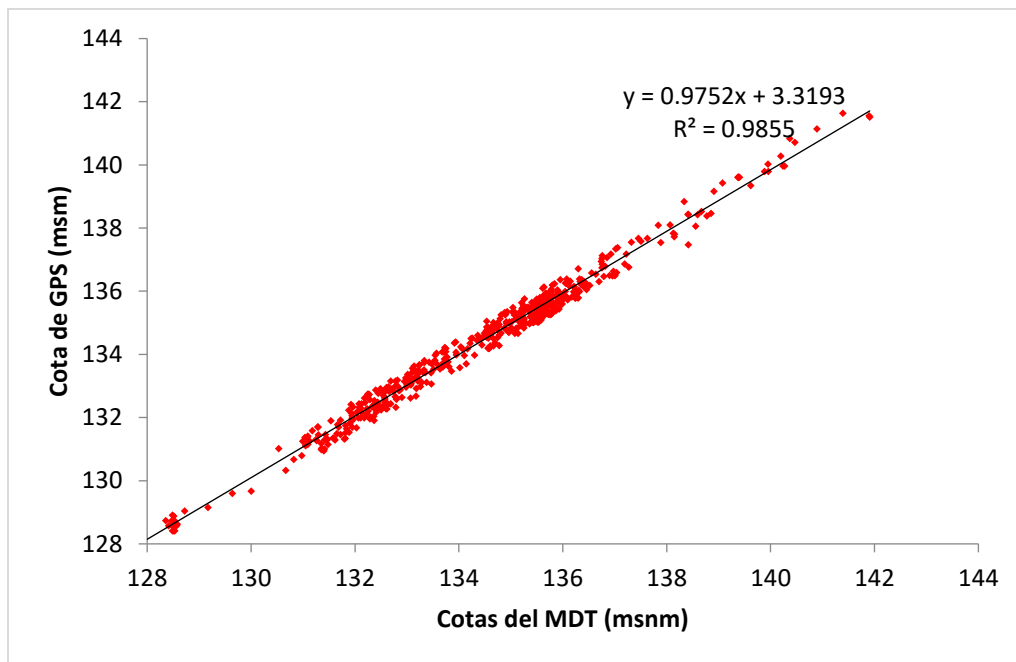


Figura 5-17 Contraste de la altura medida con GPS vs altura obtenida del MDT

La interpolación IDW (Inversa de la distancia ponderada) es una técnica de interpolación espacial que se emplea para estimar valores desconocidos de una variable en una ubicación determinada a partir de valores conocidos de la variable en ubicaciones cercanas. Este método asigna un peso a cada punto conocido según su distancia a la ubicación donde se quiere estimar el valor desconocido, de modo que los puntos más cercanos tienen un peso mayor en la estimación. El valor estimado se calcula combinando ponderadamente los valores conocidos utilizando los pesos correspondientes (Longley et al., 2005).

Este método pondera los valores cercanos con base en la distancia, asignando mayor peso a los puntos más próximos al área de interpolación. Se utiliza ampliamente en la modelación espacial para generar superficies continuas a partir de datos discretos.

Durante el análisis, se detectaron discrepancias en la altura entre los puntos de GPS y la fotogrametría, lo que indica la necesidad de caracterizar estas áreas y sus errores. Para abordar esta cuestión, se aplicó el método de interpolación IDW para evidenciar de manera espacial los errores en el eje Z. De esta manera, fue posible generar una representación continua de las áreas y sus errores, lo que facilitó la identificación de las zonas con mayores y menores errores. Este método pondera los valores cercanos con base en la distancia, asignando mayor peso a los puntos más próximos al área de interpolación. Se utiliza ampliamente en la modelación espacial para generar superficies continuas a partir de datos discretos.

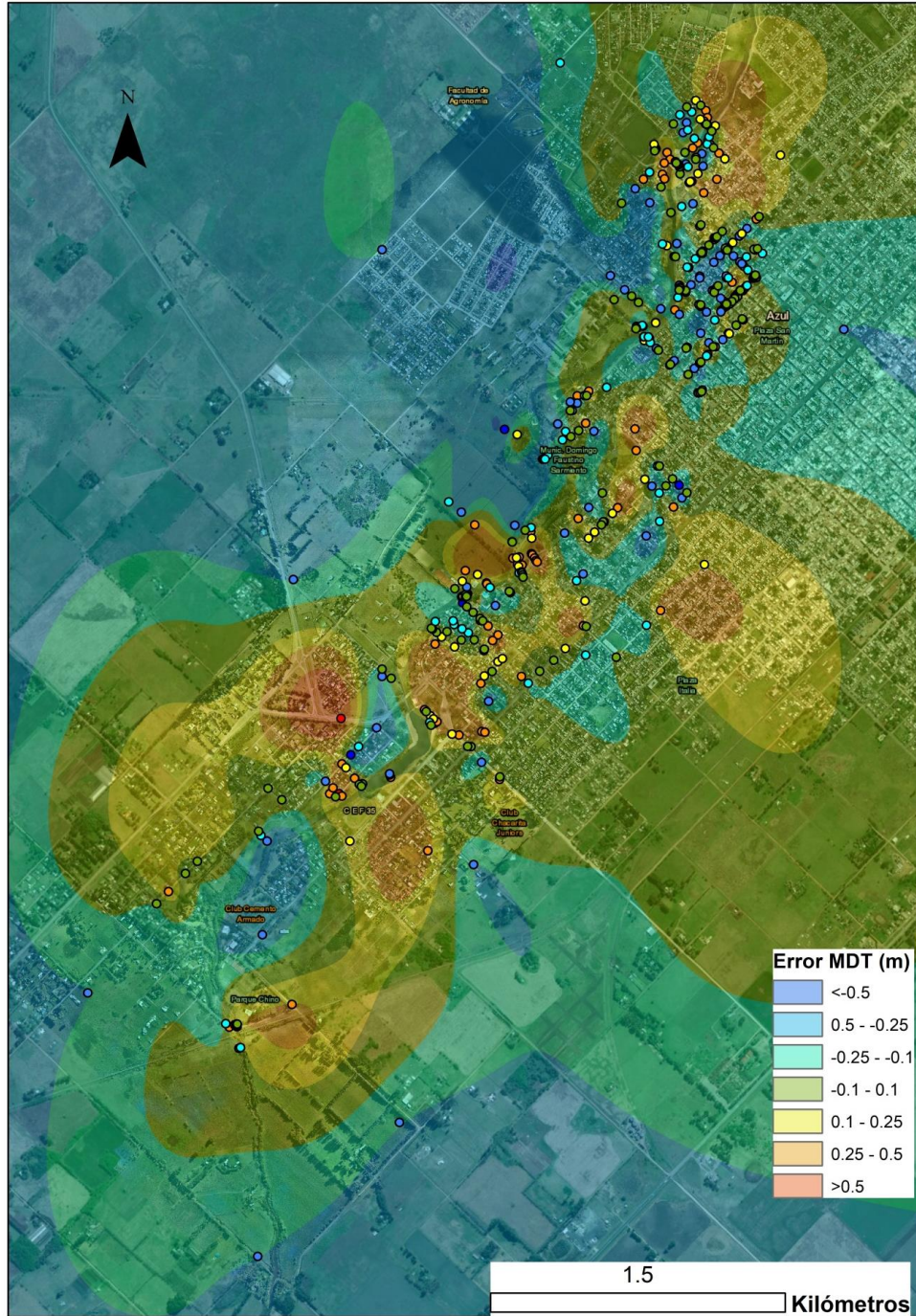


Figura 5-18 Distribución de errores del MDT generado

Los mayores errores se observan en las afueras de la ciudad, principalmente debido a las dificultades de acceso para tomar puntos de control durante la contingencia de la pandemia. Esta

situación limitó el movimiento libre y la recolección de datos en algunas áreas periféricas de la ciudad de Azul.

El modelo digital topobatemétrico se realizó a partir de la interpolación de 21 secciones transversales (Figura 5-17), las cuales cubren la totalidad del área analizada del arroyo, esta interpolación presentó un coeficiente de determinación lineal de 0.99 (Figura 5-20), demostrando una alta correlación entre los valores observados y los interpolados, el RMSE fue de 31.1 cm.

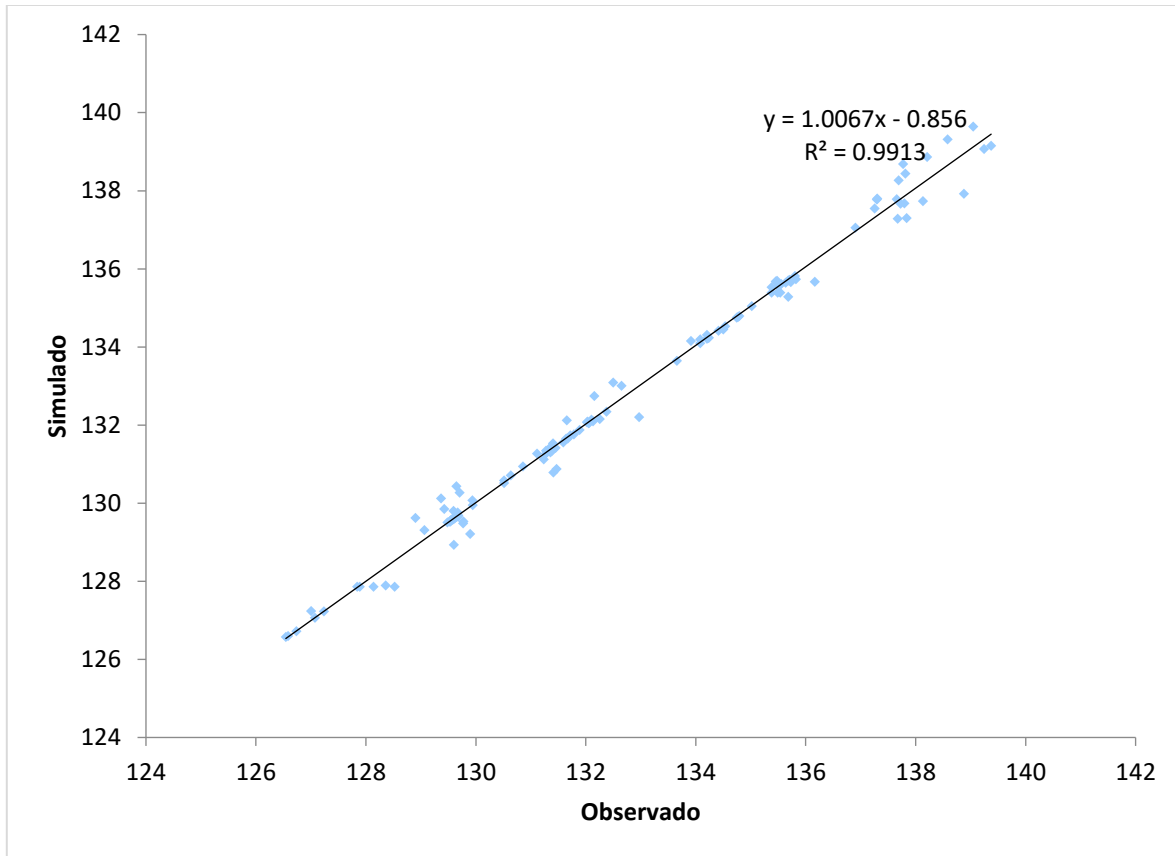


Figura 5-19 Batimetría medida vs batimetría interpolada

Se dispuso de solo 21 secciones transversales, lo que supuso asumir que la pendiente de fondo y las condiciones de los taludes eran constantes entre cada una. Por lo tanto, se procedió a interpolar estos datos, lo cual introdujo una incertidumbre considerable. Se recomienda para futuros estudios aumentar la cantidad de secciones transversales disponibles para mejorar la precisión del modelo.

5.2. Mapa de rugosidad

5.2.1. Precisión de las clasificaciones supervisadas

Para el cuantificar la precisión de la clasificación supervisada se utilizó el índice Kappa (Moriasi et al. (2007 / 2015)). Este índice es una técnica multivariable discreta utilizada para evaluar la precisión de un clasificador o modelo predictivo en la clasificación de datos categóricos, estima el grado de acuerdo entre las clasificaciones obtenidas y las clasificaciones esperadas, o verdad del terreno, en este caso puntos identificados por interpretación visual. Este índice varía entre 0 a 1, siendo 1 el acuerdo perfecto entre las clasificaciones obtenidas y las esperadas, y 0 un acuerdo esperado al azar. Se asume que la clasificación tiene un nivel de confianza alto con índices kappa superiores a 0.65 (Chuvieco, 1990):

$$\hat{k} = \frac{\sum_{i=1}^k n_{ii}}{n} - \frac{\sum_{i=1}^k n_{i+} + n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^k n_{i+} + n_{+i}}$$

Ecuación Resultados y discusión.-5 Índice Kappa

Donde:

\hat{k} Índice Kappa

n Número total de datos

n_{ii} elementos de la diagonal correctamente clasificados

n_{i+} total, de elementos de cada fila

n_{+i} total, de elementos de cada columna

El tamaño mínimo de puntos para evaluar la precisión del clasificador fue determinado con la Ecuación Resultados y discusión.-6, con $p = 85\%$, $z = 1.28$, $q = 20\%$ y $e = 5\%$. El tamaño de la muestra resultante es igual a 105 puntos.

$$n = \frac{z^2 * p * q}{e^2}$$

Ecuación Resultados y discusión.-6 Tamaño de la muestra

Donde:

n tamaño mínimo de la muestra

z constante que depende del nivel de confianza (Tabla 5-3)

e error de la muestra deseado

q proporción de individuos que no poseen la característica

p nivel de confianza

Tabla 5-3 Constante para z .

Z	1.28	1.65	1.69	1.75	1.81	1.88
<i>Nivel de confianza</i>	80	90%	91	92%	93	94%
	%		%		%	

En las Tabla 5-4 y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se presentan las matrices de confusión obtenidas de la clasificación Random forest producto de la ortofoto y de las imágenes Sentinel 2, respectivamente. Los valores de Kappa obtenidos son de 0.883 y 0.852 para la ortofoto y la imagen Sentinel, respectivamente. Es decir, el nivel de confianza obtenido con ambas clasificaciones es adecuado.

Tabla 5-4 Matriz de confusión Ortofoto

<i>Clases</i>	<i>Concreto</i>	<i>Pastos</i>	<i>Suelo desnudo</i>	<i>Bosque</i>	<i>Canal</i>
<i>Concreto</i>	32	0	1	0	0
<i>Pastos</i>	2	38	3	2	0
<i>Suelo desnudo</i>	2	2	18	0	0
<i>Bosques</i>	3	2	2	55	1
<i>Canal</i>	0	1	1	1	32

Tabla 5-5 Matriz de confusión imagen Sentinel 2

<i>Clases</i>	<i>Concreto</i>	<i>Pastos</i>	<i>Suelo desnudo</i>	<i>Bosque</i>	<i>Canal</i>
<i>Concreto</i>	44	0	0	1	0
<i>Pastos</i>	1	26	2	1	1
<i>Suelo desnudo</i>	0	2	19	3	0
<i>Bosques</i>	0	0	3	18	0
<i>Canal</i>	6	0	1	0	14

5.2.2. Resultados de la clasificación

Los resultados que se presentan a continuación corresponden al escenario hidrológico de mayo de 2012, empleado como evento de referencia para la calibración y análisis comparativo de los modelos, dadas las limitaciones de información disponibles para eventos independientes.

En la Figura 5-20 se presenta el mapa de cobertura de suelo, resultado complementar la clasificación supervisada de la ortofoto con la clasificación supervisada de la imagen Sentinel 2. La mayor parte de la superficie está cubierta por pastizales sin un patrón de distribución

claro. (concreto, suelo desnudo, pastizales, bosques y canal) con una resolución espacial de 1m y abarcando la totalidad del área de simulación.

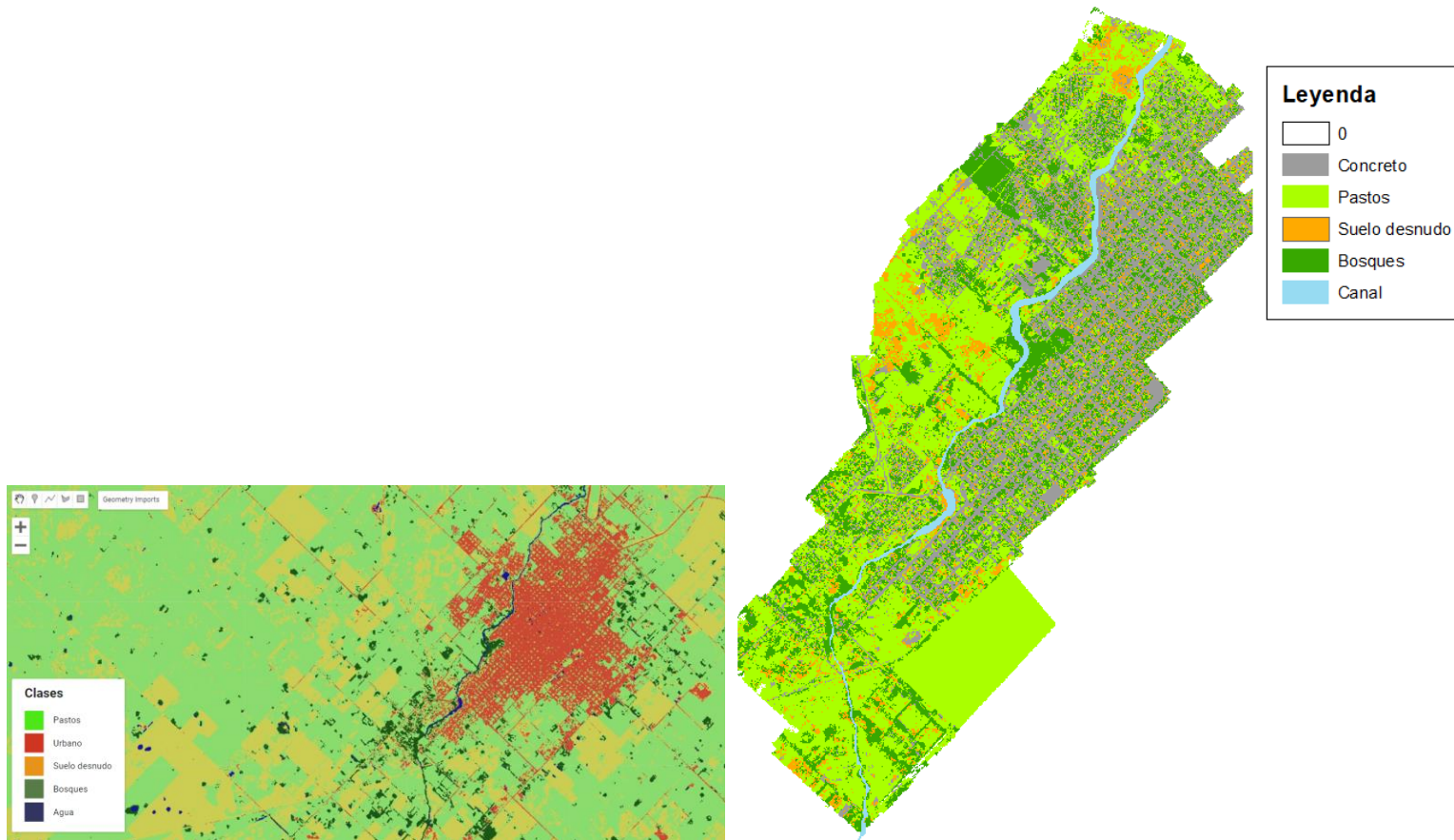


Figura 5-20 Clasificación de la ortofoto (a), imagen Sentinel-2 (b) y mapa del dominio generado (c) Mapa de rugosidad

5.3. Modelos hidrodinámicos.

Dado que no se dispone de información observada del comportamiento hidráulico del curso de agua aguas abajo del dominio de modelación durante el evento de inundación analizado, se adoptó como condición de borde a la salida del dominio la pendiente normal del cauce. Esta condición fue implementada de manera consistente tanto en el modelo IBER como en el modelo HEC-RAS, garantizando la comparabilidad entre ambos enfoques. Si bien la utilización de la pendiente normal presenta limitaciones en el contexto de crecidas extraordinarias, su influencia sobre los resultados en el área urbana de interés se ve mitigada por la extensión del dominio de cálculo aguas abajo, reduciendo la sensibilidad del modelo a la condición de borde impuesta.

5.3.1. Implementación del modelo HEC-RAS.

Par la implementación 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, En la Figura 5-23 se presenta el área simulada con HEC-RAS, igual a 745 ha. Desde la Figura 5-24 a Figura 5-28 se presenta las características geométricas

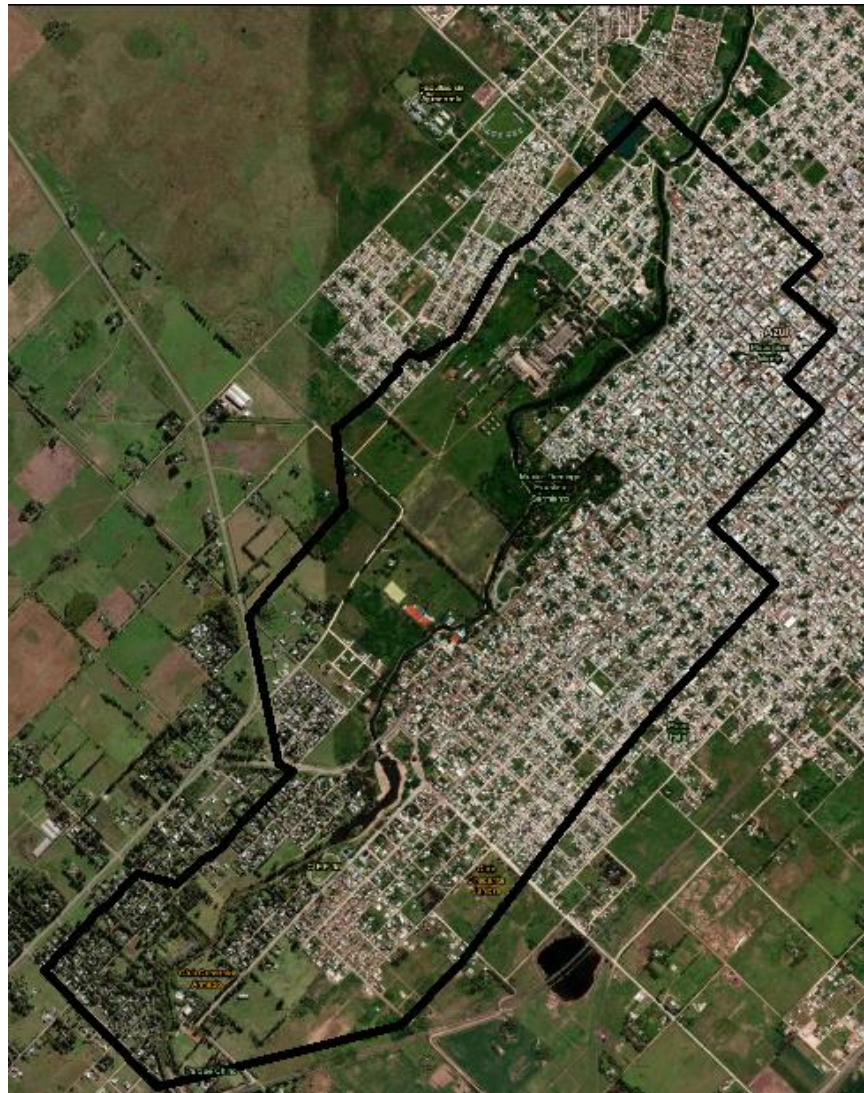


Figura 5-22 Área de cálculo para HEC-RAS

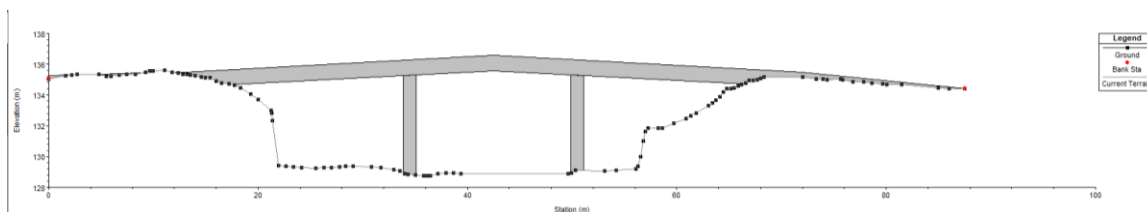


Figura 5-23 Puente Güemes

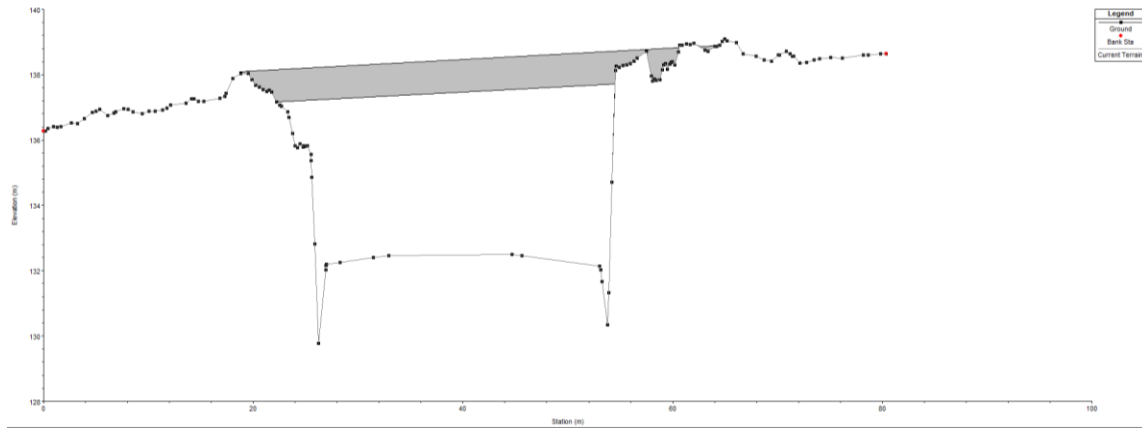


Figura 5-24 Puente Pellegrini

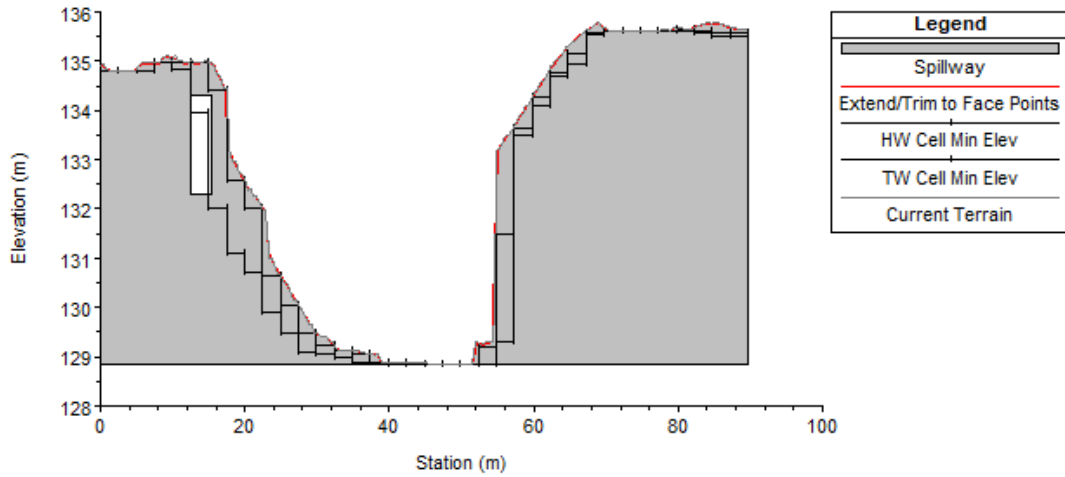


Figura 5-25 Box lateral Puente San Martin

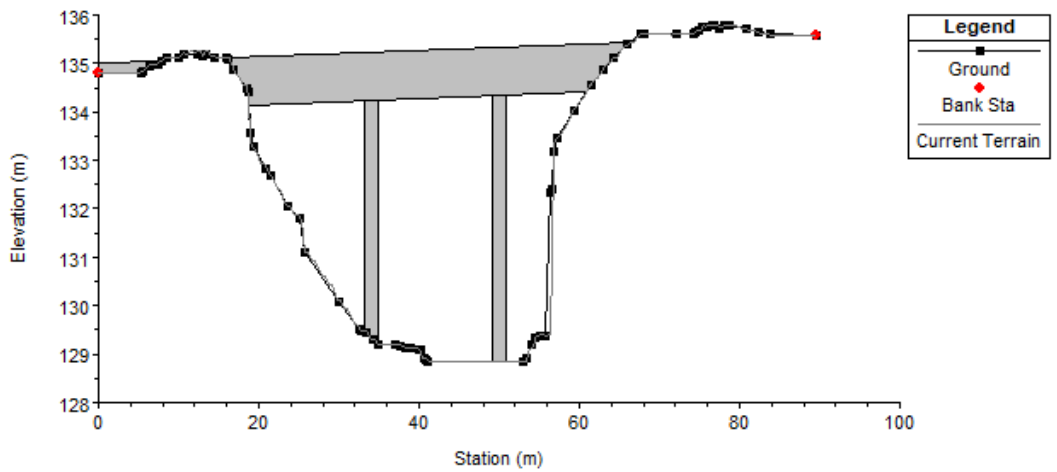


Figura 5-26 Puente San Martin

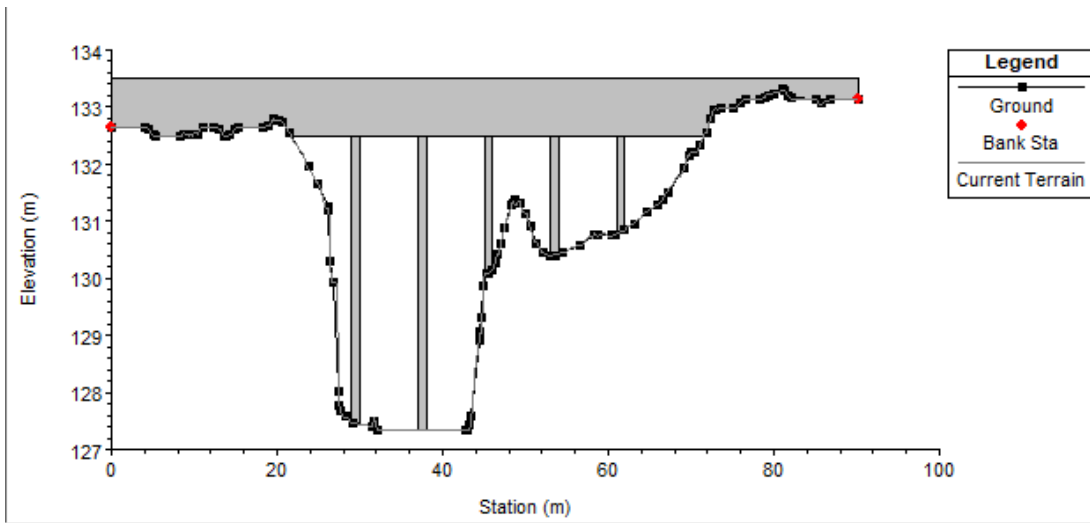


Figura 5-27 Puente Mitre

5.3.2. Implementación del modelo IBER.

En la Figura 5-28 se presenta el mallado óptimo no estructurado para la implementación del modelo IBER, conformado por un total de 122906 elementos de grilla de forma triangular.



Figura 5-28 Malla no estructurada

5.3.3. Análisis de sensibilidad.

Para optimizar el modelo, se utiliza una fracción del hidrograma, considerando que el objetivo principal de la modelación es evaluar la inundación máxima. En este contexto, la simulación se lleva a cabo hasta dos horas después del pico del caudal máximo para asegurar que este recorra completamente el tramo del canal analizado. Este enfoque permite centrarse en los momentos críticos de la inundación, reduciendo el tiempo de simulación y los recursos computacionales necesarios sin comprometer la precisión de los resultados. Al enfocar la simulación en el período más relevante del evento hidrológico, se logra una representación más eficiente y efectiva de la inundación máxima, lo cual es crucial para la planificación y gestión de riesgos asociados a

inundaciones. Además, este método facilita una respuesta más rápida en situaciones de emergencia y permite una mejor toma de decisiones en la implementación de medidas de mitigación y adaptación.

Se realizaron 7 modelaciones para el evento de mayo de 2012 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), cómo se evidencia en la Tabla 5-6, el coeficiente de Manning se varia para todas las coberturas usando un único factor multiplicador, que varía según el escenario propuesto.

Tabla 5-6 Rango de variación del coeficiente Manning para los usos de suelo existentes

<i>Cobertura</i>	<i>n -30%</i>	<i>n -20%</i>	<i>n -10%</i>	<i>n medio</i>	<i>n +10%</i>	<i>n +20%</i>	<i>n +30%</i>
<i>Concreto</i>	0.0105	0.012	0.0135	0.015	0.0165	0.018	0.0195
<i>Pastos</i>	0.021	0.024	0.027	0.03	0.033	0.036	0.039
<i>Suelo desnudo</i>	0.0161	0.0184	0.0207	0.023	0.0253	0.0276	0.0299
<i>Bosques</i>	0.14	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26
<i>Canal</i>	0.0175	0.02	0.0225	0.025	0.0275	0.03	0.0325

- HEC-RAS

Se aplicó el índice de Jaccard (Ecuación Metodología-1 y Ecuación Metodología-2) para el análisis de sensibilidad, comparando con la impronta máxima del evento de Mayo (estimada a través de fotografías de personas y periódicos) versus la máxima extensión de inundación computacional (en inglés: maximum water surface elevation),

En la Tabla 5-7 se presenta el efecto de n en el índice Jaccard calculado entre las improntas máximas simuladas y registradas en el evento de calibración. Este índice aumentó con el incremento de n, aunque la sensibilidad es baja, el mismo osciló entre 0.66 y 0.71 para n – (n*10%) y n + (n*30%), respectivamente.

Además, se determinó que los intervalos de simulación necesarios para garantizar la estabilidad del modelo son de 30 segundos para las alternativas de Manning inicial y positivas. Por otro lado, para las alternativas negativas, se encontró que el intervalo inicial requerido es de 15 segundos. Es

importante destacar que los tiempos de simulación son más prolongados para este último conjunto de simulaciones, debido al incremento en la velocidad del flujo, lo cual demanda un intervalo más fino para representar con precisión el fenómeno, en todo momento se usó el solucionador ELM-SWE.

Tabla 5-7 Sensibilidad de rugosidad para sub grilla HEC-RAS de 15m

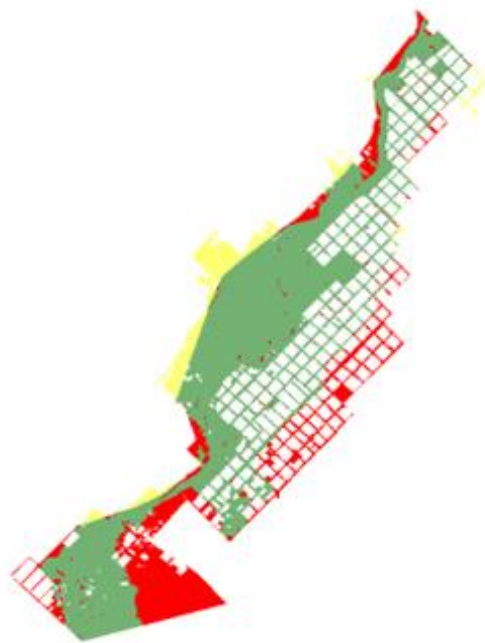
	<i>Escenario</i>	<i>Intervalo de cálculo (s)</i>	<i>Tiempo de simulación(H:m's'')</i>	<i>índice Jaccard</i>
La unión polígonos impronta medida clases impronta no	<i>Manning +30%</i>	30	0:06'54''	0.71
	<i>Manning +20%</i>	30	0:06'44''	0.69
	<i>Manning +10%</i>	30	0:07'28''	0.67
	<i>Manning inicial</i>	30	0:07'35''	0.66
	<i>Manning -10%</i>	15	0:12'02''	0.66
	<i>Manning -20%</i>	15	0:11'34''	0.65
	<i>Manning -30%</i>	15	0:11'56''	0.66

de los
de la
simulada y
generó tres
distintas:
medida y
simulada,
impronta simulada y medida, e impronta simulada y no medida. Al analizar estas clases (Figura 5-29, Figura 5-30, Figura 5-31, Figura 5-32, Figura 5-33, Figura 5-34, Figura 5-35), se pudo evidenciar que, en la zona sur del modelo, específicamente en un área no urbana cerca del Puente AMCA, el modelo no logra inundar completamente la zona.



■ Medido
 ■ Medido y Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-29 Manning +10% Jaccard 0.67



■ Medido
 ■ Medido y Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-30 Manning +20% Jaccard 0.69



■ Medido
 ■ Medido y Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-31 Manning +30% Jaccard 0.71



■ Medido
 ■ Medido y Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-32 Manning inicial% Jaccard 0.66



■ Medido
 ■ Medido v Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-33 Manning -10% Jaccard0.66



■ Medido
 ■ Medido v Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-34 Manning -20% Jaccard 0.65



■ Medido
 ■ Medido y Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-35 Manning -30% Jaccard0.66

Partiendo de los resultados de la calibración y la interpretación del comportamiento de la inundación y las direcciones de flujo en las diferentes áreas del modelo, se llevaron a cabo varias iteraciones utilizando diferentes combinaciones de coeficientes de Manning. Después de analizar los resultados de cada iteración, se identificó que la combinación que mejor representa el modelo se presenta en la Tabla 5-8. Esta combinación específica de coeficientes de Manning logra una mejor concordancia entre los datos observados y los simulados.

Además, como parte del proceso de evaluación, se realizó un ajuste en el tamaño del sub-grillado. Se evaluaron los escenarios de 15, 10 y 5 metros para determinar el impacto de la resolución espacial en los resultados del modelo. Esto permitió analizar cómo variaciones en la precisión del sub-grillado influyen en la representación de la inundación y las direcciones de flujo en el modelo hidrodinámico.

Tabla 5-8 Valores de Manning calibrados

Rugosidad	Manning
concreto	0.015
pasturas	0.039
suelo desnudo	0.018
bosques	0.26
canal	0.0325

Durante el análisis de sensibilidad del modelo utilizando valores de grilla de 5, 10 y 15 metros, se observó que se necesitaban 15 segundos para estabilizar el modelo en los escenarios de 10 y 15 metros, mientras que para 5 metros (solo) se requerían 5 segundos. Como resultado, los tiempos de cálculo aumentaron significativamente, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 5-9 Tiempos de cálculo para diferentes tamaños de malla

<i>Escenario</i>	<i>Intervalo de cálculo (s)</i>	<i>Tiempo de simulación(H:m's'')</i>	<i>índice Jaccard</i>
<i>Sub grilla de 15m</i>	15	0:07'35''	0.747
<i>Sub grilla de 10m</i>	15	0:17'44''	0.748
<i>Sub grilla de 5m</i>	05	2:45'33''	0.759



■ Medido
 ■ Medido v Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-36 Sub Grilla de 15m Jaccard 0.747



■ Medido
 ■ Medido v Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-37 Sub grilla de 10m Jaccard 0.748

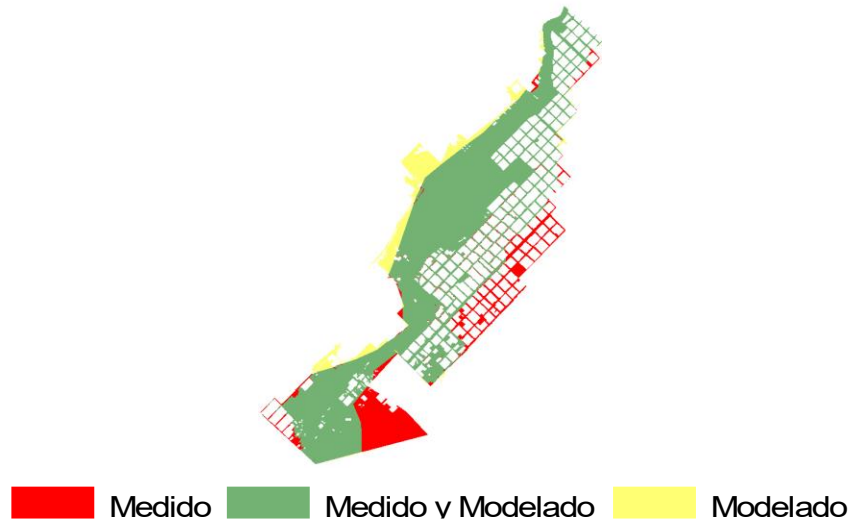


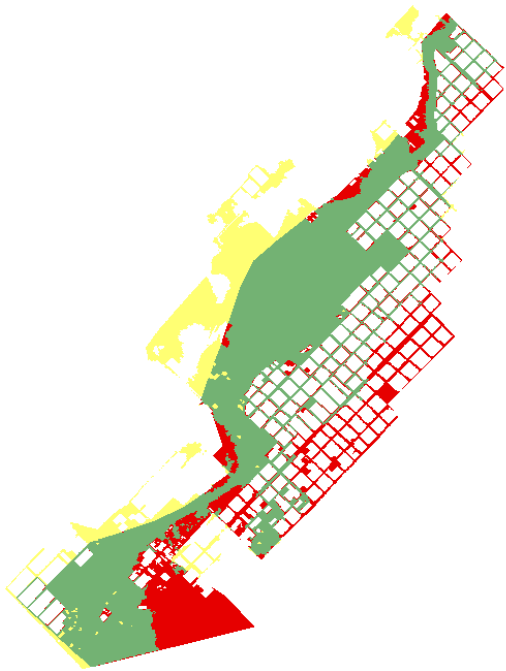
Figura 5-38 Sub grilla de 5m Jaccard 0.759

- IBER

En la Tabla 5-10 se presenta el análisis de sensibilidad del modelo IBER al n. Por tal razón, se opta por una grilla de 5 metros en las áreas urbanas y hasta 10 metros en las áreas rurales, con este mallado y con el hidrograma Figura 5-52 se realiza el análisis de sensibilidad a la rugosidad se usó un CFL de 0.45. El índice Jaccard osciló entre 0.59 y 0.75, en general se precia una tendencia de mejora a medida que el n se mantiene cercano a los valores iniciales.

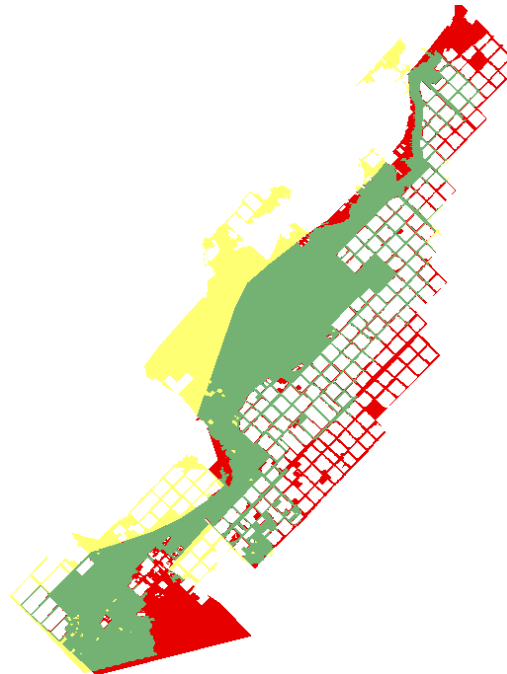
Tabla 5-10 Sensibilidad de rugosidad para grilla flexible IBER de 5-10m

<i>Escenario</i>	<i>Tiempo de simulación(H:m"s")</i>	<i>índice Jaccard</i>
<i>Manning +30%</i>	0:24'32"	0.591
<i>Manning +20%</i>	0:24'16"	0.582
<i>Manning +10%</i>	0:44'50"	0.614
<i>Manning inicial</i>	0:24'33"	0.666
<i>Manning -10%</i>	0:24'39"	0.638
<i>Manning -20%</i>	0:24'31"	0.601
<i>Manning -30%</i>	0:24'52"	0.615
<i>Calibrado</i>	0:25'52"	0.751



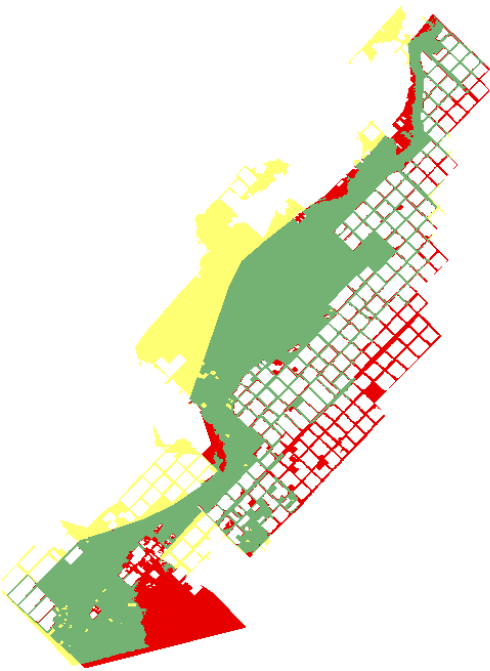
■ Medido
 ■ Medido v Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-39 Manning +10% Jaccard 0.61



■ Medido
 ■ Medido v Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-40 Manning +20% Jaccard 0.58



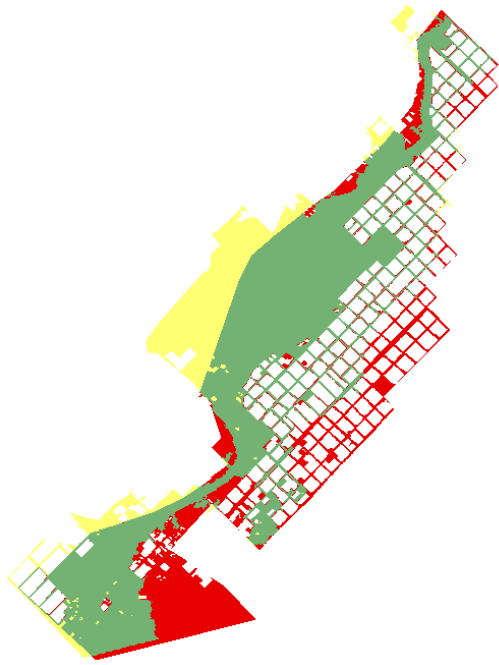
■ Medido
 ■ Medido v Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-41 Manning +30% Jaccard 0.59



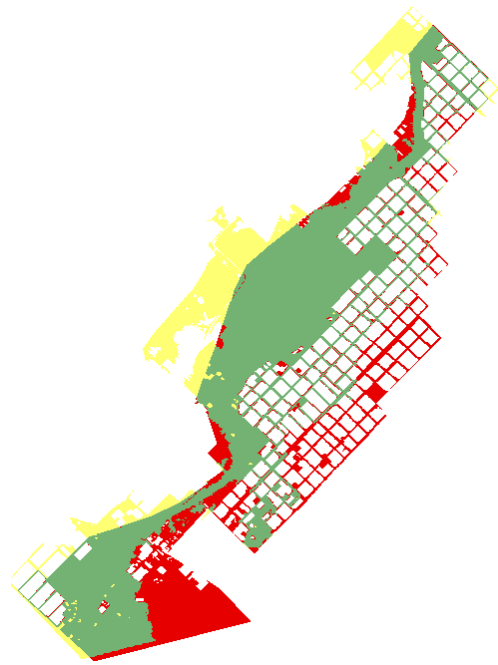
■ Medido
 ■ Medido v Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-42 Manning inicial% 0.66



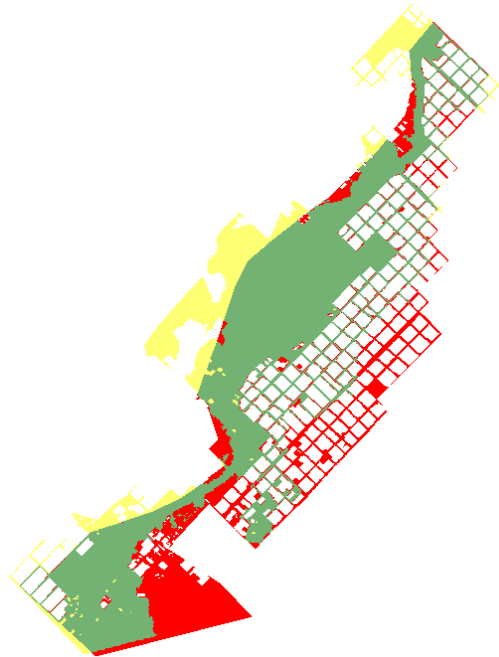
■ Medido
 ■ Medido y Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-43 Manning -10% Jaccard 0.638



■ Medido
 ■ Medido y Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-44 Manning -20% Jaccard 0.601



■ Medido
 ■ Medido y Modelado
 ■ Modelado

Figura 5-45 Manning -30% Jaccard 0.61

Para realizar una óptima comparación de las modelaciones entre ambos programas usa para el modelo IBER el mismo arreglo de rugosidades usado para el escenario calibrado de HEC-RAS (Tabla 5-8), obteniendo un índice de Jaccard de 0.751 (Figura 5-46)

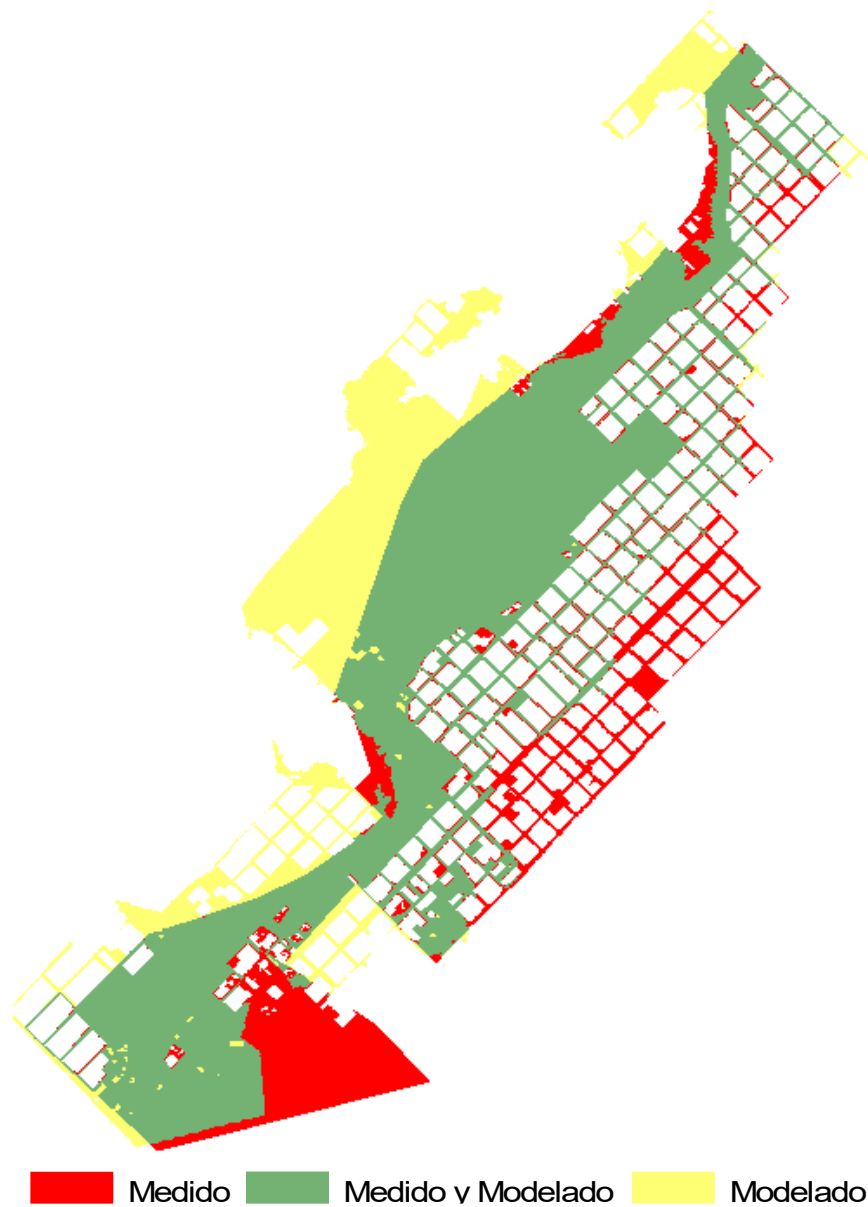


Figura 5-46 Clasificación modelo calibrado Jaccard 0.751

5.1. Calibración

Para la fecha de la inundación analizada (año 2012), no fue posible identificar imágenes satelitales, ni de tipo radar ni ópticas, con cobertura temporal y espacial adecuada que permitieran evidenciar

la magnitud del evento y confirmar su impacto, por lo que la contrastación se realizó a partir de la información de campo disponible.

Para realizar una calibración de tirantes de las inundaciones se consultó a la población de la ciudad de Azul por las alturas de inundación registradas en los eventos del 17 de mayo de 2012, obteniendo 50 puntos (Figura 5-47), se evidenció que las personas encuestadas no lograron diferenciar las alturas de ambos eventos y que sus respuestas eran poco precisas, esto debido a los 8 años transcurridos desde la inundación hasta la época de la encuesta, por tal razón esta información se toma con cautela y no se usa en la calibración del modelo. Para evaluar la capacidad de los modelos para representar los puntos encuestados se extrajeron las alturas o tirantes simulados de las máximas extensiones de inundación computacional de los modelos HEC-RAS e IBER. (Figura 5-47 y Figura 5-48).

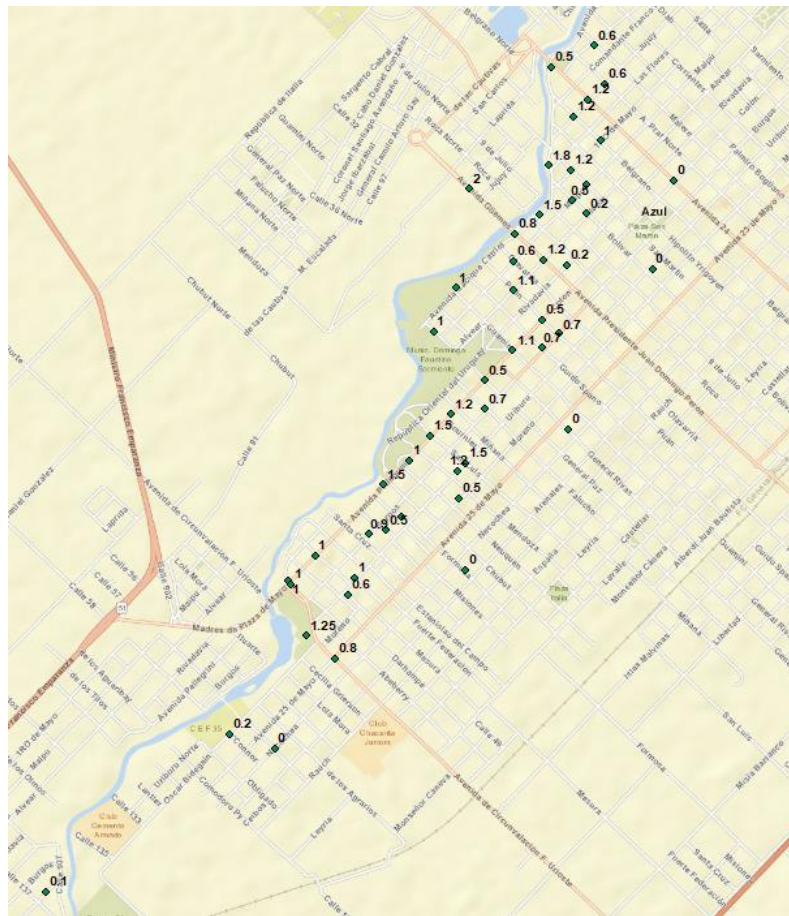


Figura 5-47 Alturas de inundación encuestadas

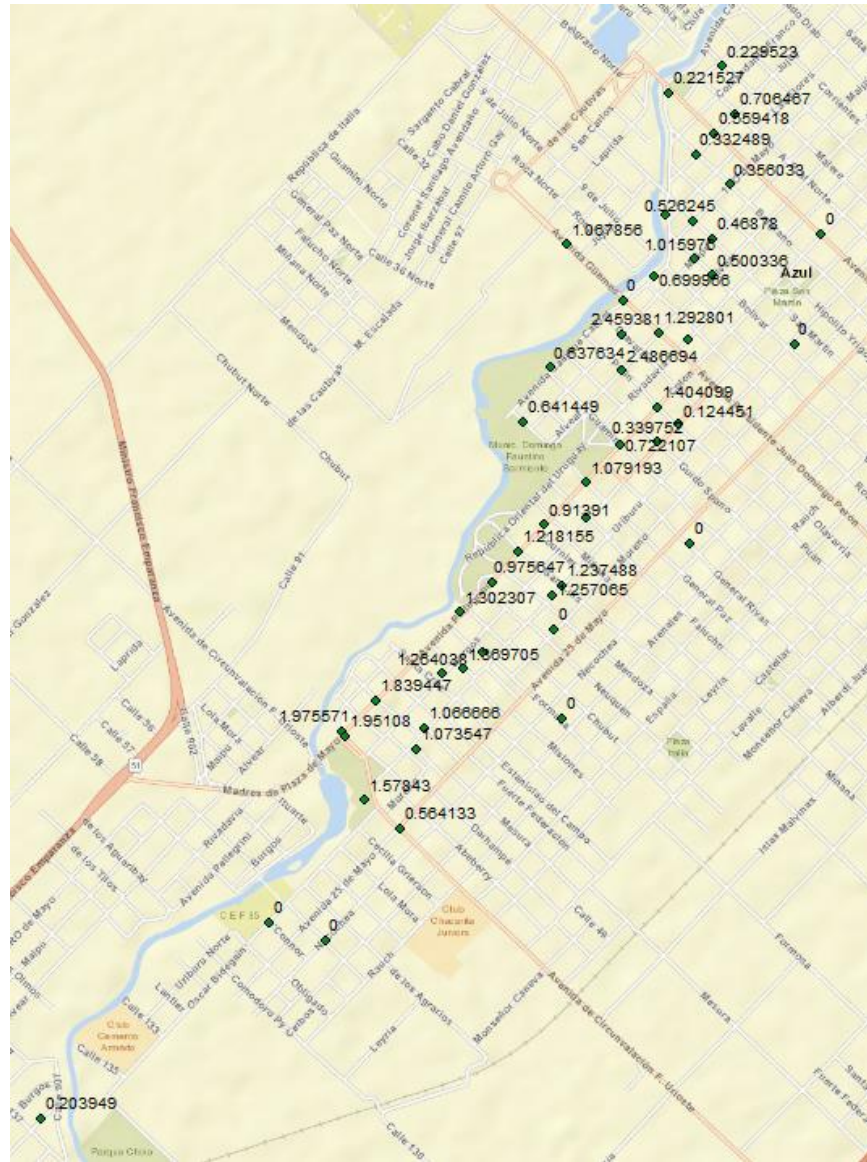


Figura 5-48 Alturas de inundación del modelo HEC-RAS en los puntos encuestados

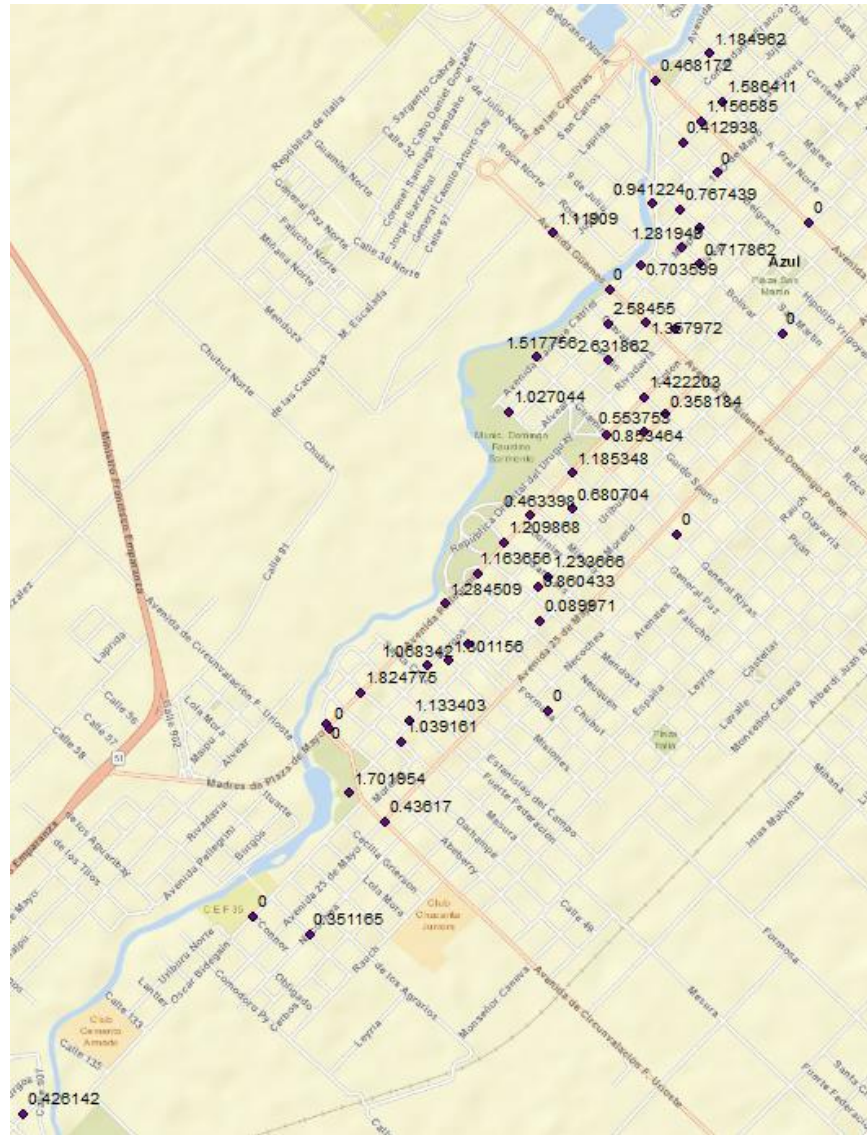


Figura 5-49 Alturas de inundación del modelo IBER en los puntos encuestados

La encuesta arroja alturas que van desde los 0 hasta los 2 metros de altura, mientras que los modelos reportan alturas máximas de 2.48m en HEC-RAS y 2.63m en IBER. En la Figura 5-50 se puede evidenciar que las encuestas tienen 3 modas en 1, 0.6 y 0 metros; las alturas para estos puntos obtenidas con el modelo HEC-RAS, mantienen 3 modas menos pronunciadas y teniendo una densidad de puntos homogénea entre 0 y 1.2 metros; las alturas obtenidas con el modelo IBER presenta 3 modas una con bastante densidad cerca de los 1.2 metros y las otras dos más homogéneas en 0.5 y 0 metros.

Se ha agregado una nota metodológica explicando las limitaciones de los datos obtenidos, la posible presencia de sesgos y el nivel de confianza en los resultados.

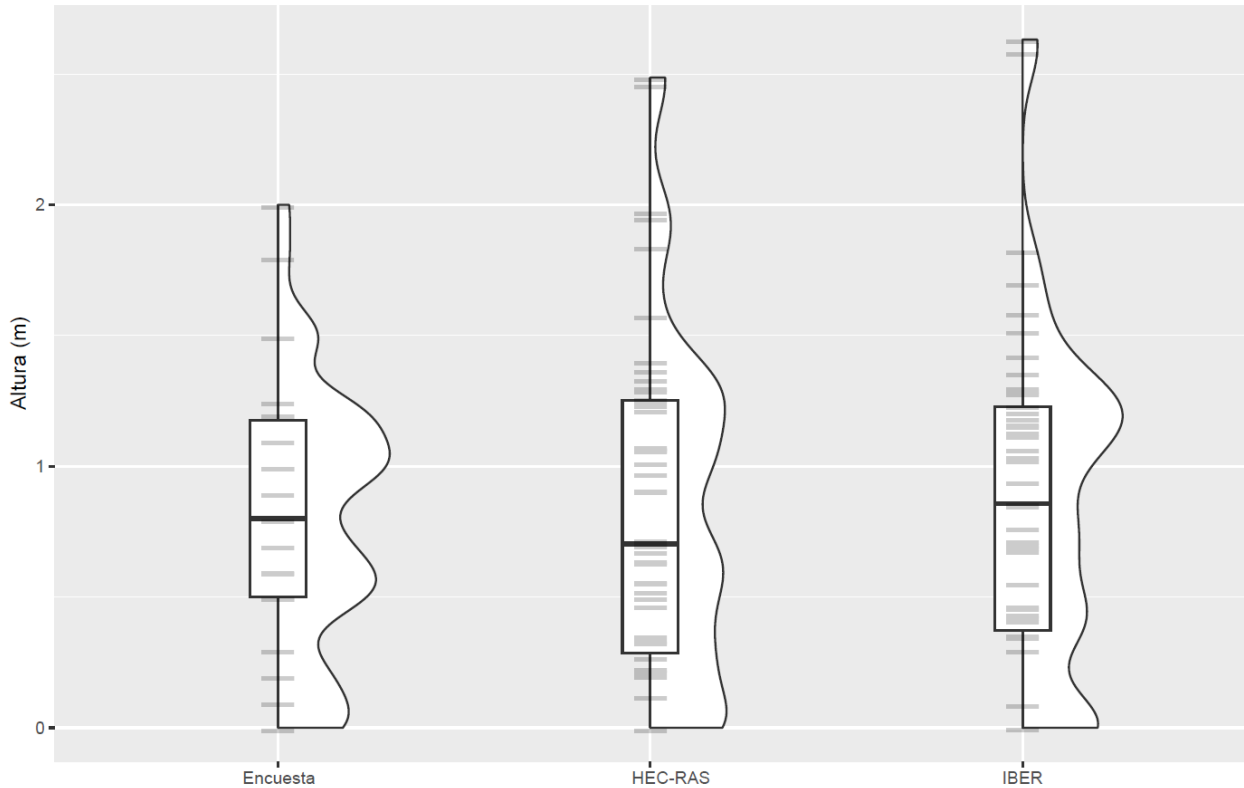


Figura 5-50 Comparación de alturas encuestadas con alturas obtenidas en modelos

Para comparar la representación las alturas encuestadas por parte de ambos modelos, se realiza la resta entre los datos modelados y los encuestados (Figura 5-51). El modelo HEC-RAS presenta una concentración cerca de 0 metros de diferencia, evidenciando un máximo de 1.85 y un mínimo de -0.93 metros; el modelo IBER, presenta una diferencia máxima de 1.98 y mínima de -1, con una concentración cercana a 0 y entre -0.7 y -1. de esta manera los errores medios para los modelos HEC-RAS e IBER son de 0.026 y 0.056 respectivamente, evidenciando que el modelo HEC-RAS representa con mayor precisión las alturas encuestadas.

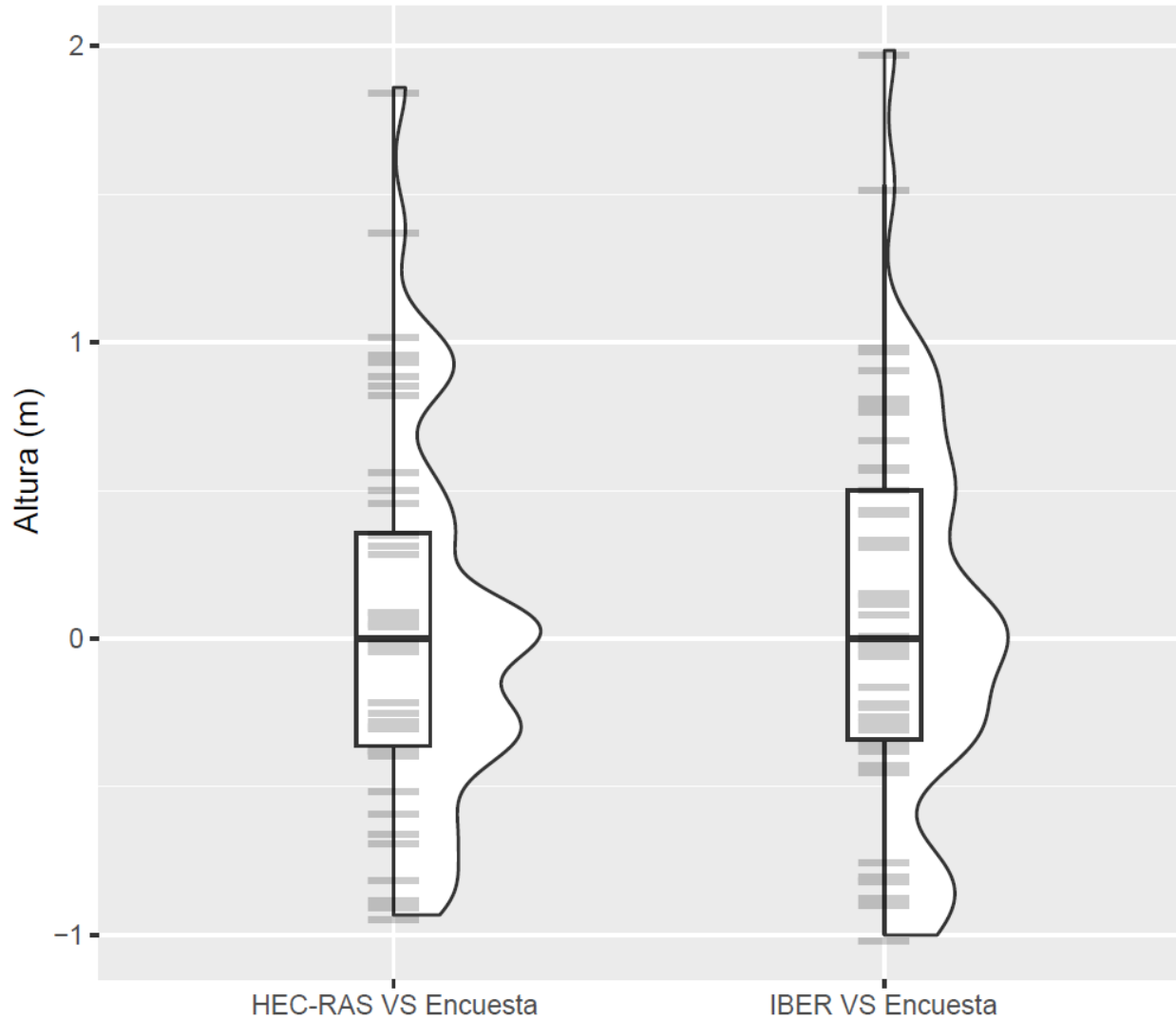


Figura 5-51 Comparación diferencias de los modelos frente a la encuesta

5.2.Comparación modelos

En el estudio se llevaron a cabo comparaciones de tiempos de ejecución en ocho escenarios de modelación. En estos escenarios, se analizaron los resultados obtenidos considerando la sensibilidad del modelo frente a las variaciones del coeficiente de rugosidad de Manning (n). Para optimizar los tiempos de cálculo, en ambos modelos se simuló la crecida entre el 15 de mayo del 2012 a las 00:00 hasta poco después del pico el 19 de mayo del 2012 a las 16:00 (Figura 5-52)

El coeficiente de rugosidad afecta directamente la velocidad del flujo y la altura del agua, influyendo en la calibración del modelo y en su precisión en la representación de eventos hidrológicos.

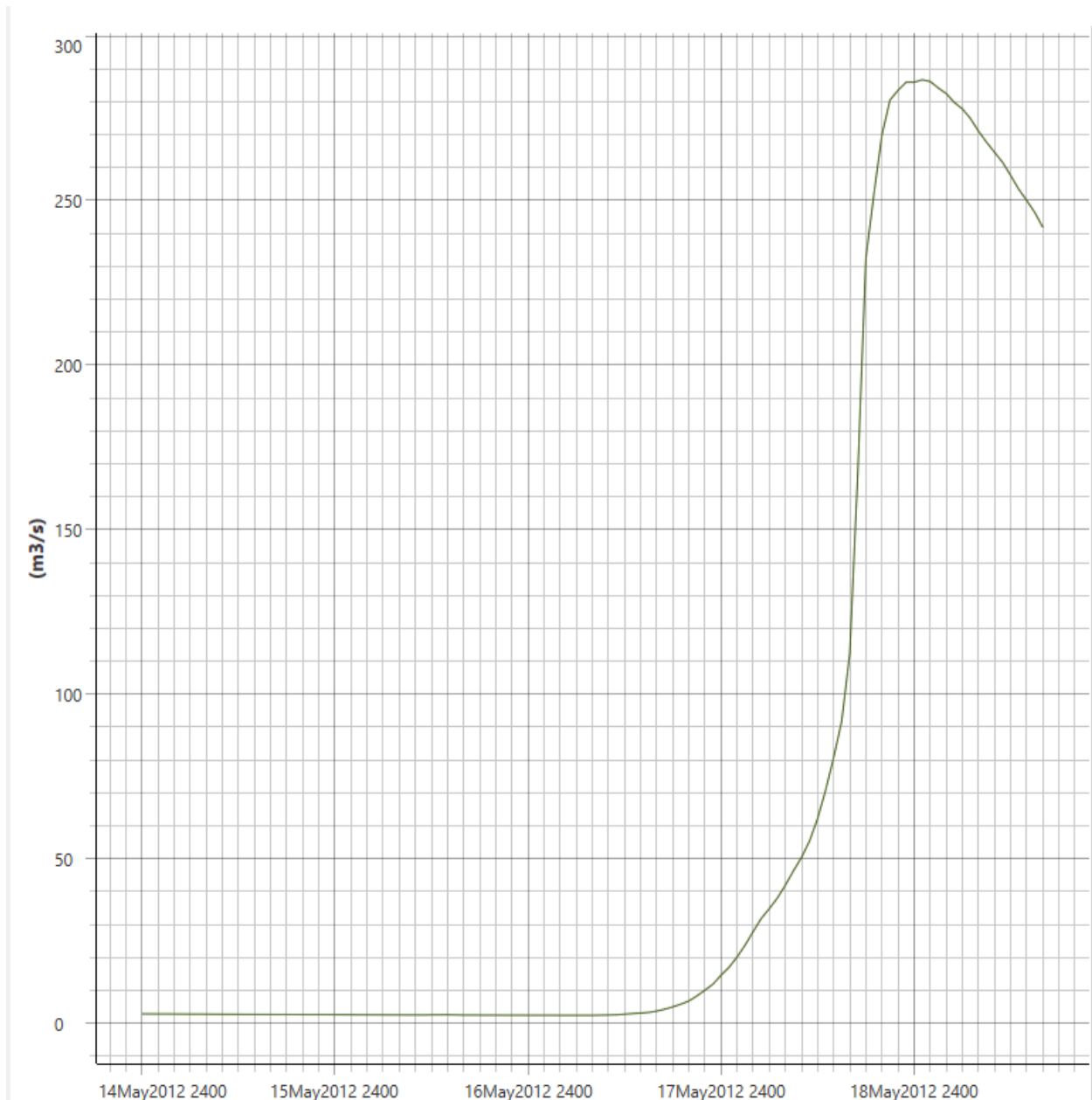


Figura 5-52 Hidrograma de simulación.

La comparación de los resultados de ambos modelos simulados con el hidrograma de la Figura 5-52 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 5-53) 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 fue el del 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 5-11.

Tabla 5-11 Características computacionales

	CFL	Mallado	N celdas	Tipo Procesador
HEC-RAS (Implícito)	Δt 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	$\Delta l = 5-10$ (flexible no estructurado, Delaunay)	122906	GPU 768 Cores 1291 MHz Base Clock 16 GB Memory

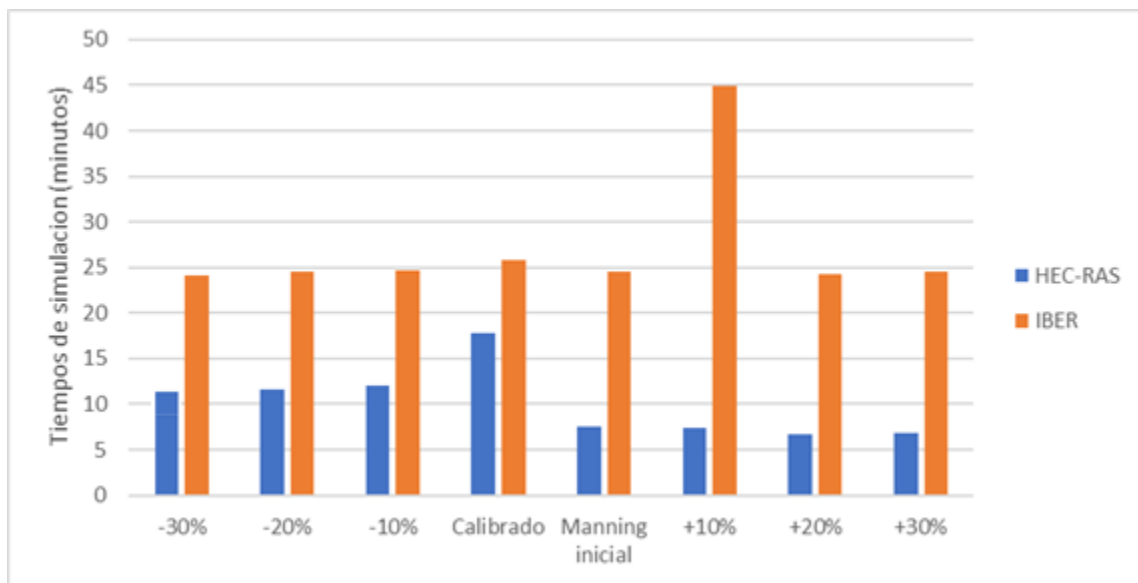


Figura 5-53 Comparación de tiempos de ejecución de modelo IBER y HEC-RAS

Para comparar los resultados de los modelos calibrados de IBER (calibrado) y HEC-RAS (calibrado con malla de 10 metros) en relación con la simulación de la cota de inundación, se realizaron dos análisis usando los resultados de IBER y HEC-RAS de mayor índice de Jaccard. En primer lugar, se calculó el diferencial de la cota de inundación simulada por cada modelo (Figura 5-54). Luego, se construyó un histograma que muestra la distribución de este diferencial (Figura 5-55).

La comparación del diferencial de las cotas de inundación entre los resultados exportados ambos modelos con un pixel de 0.5m (Figura 5-54) 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 5-21).

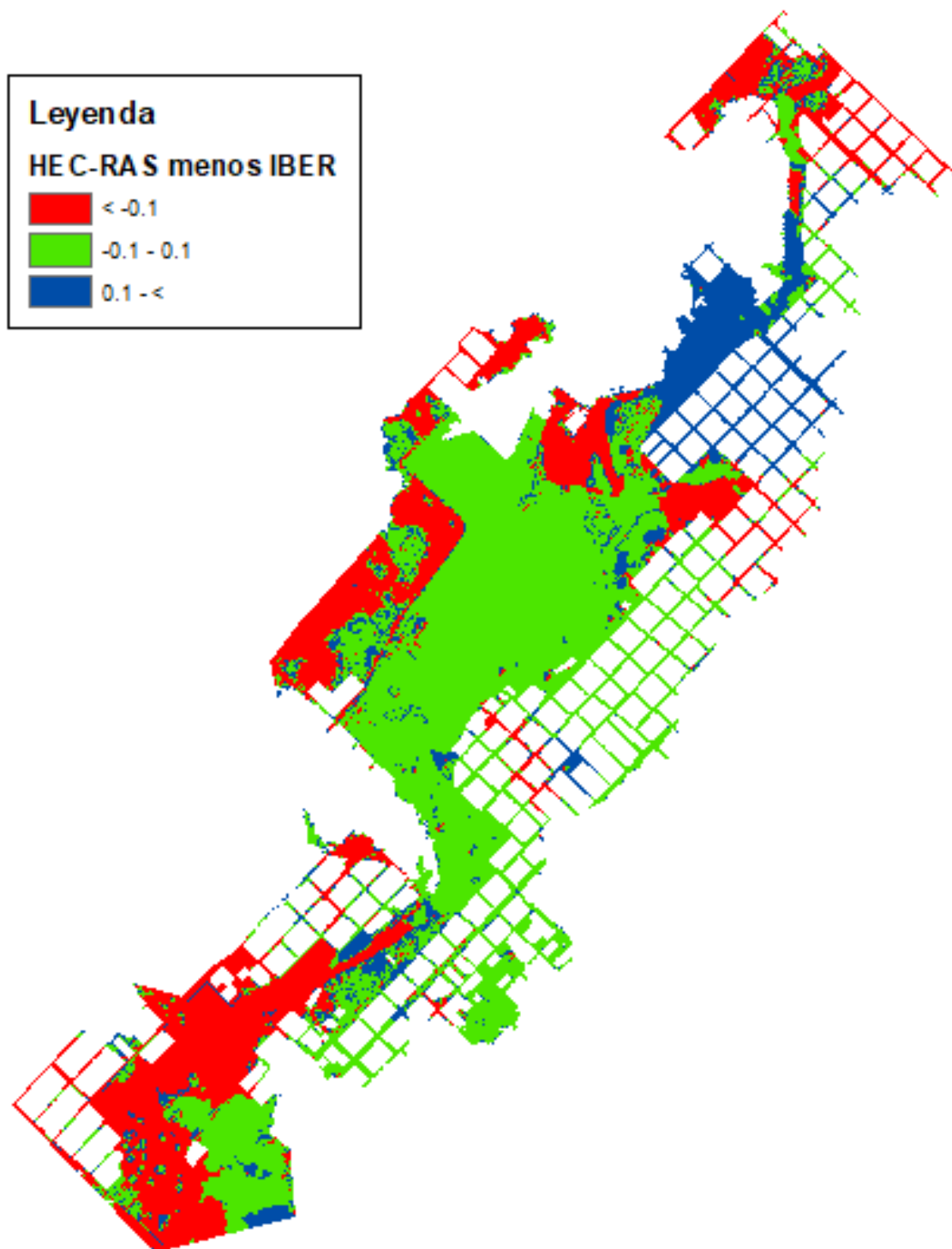


Figura 5-54 Diferencia de cota de inundación HEC-RAS menos IBER

El histograma muestra una tendencia asimétrica hacia la izquierda y un comportamiento bimodal con picos en -0.3 y 0. Aunque la mayor cantidad de píxeles presentan diferencias cercanas a 0, hay una cantidad considerable de píxeles donde el modelo IBER presenta una cota superior a HEC-RAS (Figura 5-55).

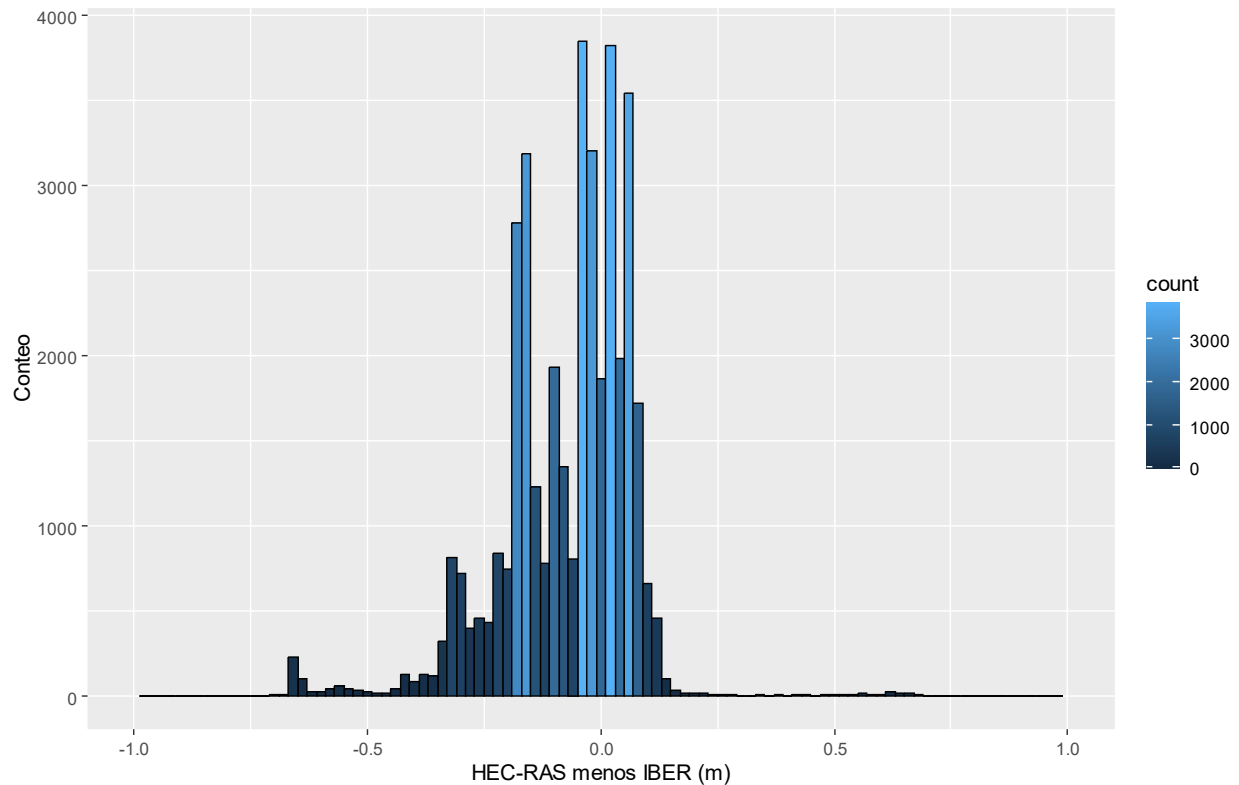


Figura 5-55 Histograma de diferencias de altura entre los modelos (HEC-RAS – IBER)

de acuerdo a lo anterior se evidencia que en el área rural del norte de la ciudad es donde más se presentan errores de modelación, esta discrepancia puede deberse a diferentes factores, como imprecisiones en la medición de la impronta, una cantidad reducida de puntos de control topográficos o la presencia de encharcamientos por lluvia que no son producto del desborde del arroyo. Estos elementos podrían influir en la capacidad del modelo para representar con precisión el fenómeno de inundación en dicha área.

6. Conclusiones.

El presente trabajo permitió alcanzar de forma satisfactoria los objetivos propuestos, aportando significativamente al mejoramiento de las metodologías de análisis de inundaciones en áreas urbanas de llanura, mediante el uso combinado de herramientas de modelación hidrodinámica bidimensional, tecnologías de captura remota y plataformas de software libre.

A continuación, se presentan las conclusiones principales de acuerdo con cada uno de los objetivos específicos establecidos:

6.1. Evaluación de modelos hidrodinámicos bidimensionales

Se implementaron y compararon dos modelos hidrodinámicos 2D (HEC-RAS e IBER), empleando una misma base topográfica, condiciones de contorno y mapa de rugosidad. Ambos modelos fueron calibrados con el evento de inundación ocurrido en mayo de 2012 en la ciudad de Azul, y posteriormente validados. Los resultados obtenidos demostraron que ambos enfoques son viables para representar con precisión espacial y temporal eventos de inundación en entornos urbanos.

HEC-RAS, basado en un enfoque implícito, ofreció mayor estabilidad numérica y menores tiempos de ejecución, lo que lo hace especialmente adecuado para ser integrado en sistemas de alerta temprana operativos. IBER, por su parte, emplea un enfoque explícito y una malla no estructurada que permitió una representación más detallada del flujo en áreas urbanas complejas, aunque con mayores demandas computacionales.

Los índices de ajuste, como el RMSE para los tirantes y el índice de Jaccard para las improntas, mostraron valores adecuados para ambos modelos, validando su aplicación en contextos similares.

6.2. Generación de base topográfica de alta precisión

Se logró desarrollar un modelo digital de terreno (MDT) de alta resolución (0,3 m) mediante fotogrametría digital con drones (RPAS), complementado con información batimétrica y

relevamientos detallados de estructuras hidráulicas como puentes. El modelo fue ajustado con 568 puntos GPS diferenciales y validado, alcanzando un error cuadrático medio (RMSE) de 29,6 cm y un coeficiente de determinación (R^2) de 0,985, lo cual evidencia una precisión suficiente para estudios hidrodinámicos en zonas de llanura.

Asimismo, se construyó un mapa de rugosidad detallado mediante técnicas de clasificación supervisada aplicadas a ortofotos y a imágenes satelitales Sentinel-2. Esta información fue fundamental para la correcta asignación espacial de los coeficientes de Manning, lo que permitió mejorar sustancialmente la calibración de ambos modelos.

Cabe destacar que la calidad de la base topográfica generada constituye uno de los principales aportes metodológicos de esta investigación, ya que en áreas de llanura pequeñas diferencias altimétricas producen efectos significativos en la propagación del flujo.

6.3. Aporte al sistema de alerta temprana por inundaciones

El modelo hidrodinámico calibrado y validado desarrollado en este trabajo representa un insumo técnico clave para el fortalecimiento del sistema de alerta temprana de la ciudad de Azul. A diferencia de los sistemas actuales basados en umbrales hidrométricos, la modelación bidimensional permite una simulación espacio-temporal del comportamiento del agua, brindando información detallada sobre zonas potencialmente afectadas, tiempos de llegada del flujo y tirantes máximos.

Esta información permite a las autoridades anticipar escenarios de riesgo, mejorar los protocolos de evacuación y tomar decisiones basadas en evidencia científica. Además, al haber sido desarrollado con herramientas de libre acceso, el modelo resulta replicable y escalable a otros municipios con características similares, incluso en contextos de limitada capacidad institucional.

6.4.Consideraciones metodológicas adicionales

- El uso de RPAS y software de código abierto permitió democratizar el acceso a tecnología de alto nivel, facilitando la generación de productos cartográficos precisos y de bajo costo, adecuados para la gestión del riesgo hídrico.
- La participación ciudadana, mediante encuestas para reconstrucción de improntas de inundación, resultó un mecanismo válido para validar la modelación en ausencia de registros instrumentales extensos.
- Se observó una alta sensibilidad del modelo a la calidad del MDT, la representación de estructuras hidráulicas y la calibración del coeficiente de rugosidad. Se recomienda, por tanto, una actualización periódica de estos insumos para mantener la precisión de las simulaciones.

6.5.Limitaciones y líneas futuras de investigación

Si bien se lograron resultados satisfactorios, se identificaron algunas limitaciones relevantes. La escasez de registros instrumentales recientes dificultó la validación del modelo en múltiples eventos. En este sentido, se sugiere fortalecer las redes de monitoreo hidrológico locales y establecer protocolos de levantamiento post-evento.

Asimismo, se propone como línea futura de investigación la integración del modelo hidrodinámico con sistemas de predicción meteorológica en tiempo real y modelos hidrológicos urbanos, lo que permitiría cerrar el ciclo completo de simulación-acción dentro de un sistema de alerta temprana. Finalmente, se considera valioso evaluar la incorporación de sensores LiDAR en RPAS para mejorar la detección de elementos verticales que afectan el flujo superficial, y avanzar hacia modelaciones aún más detalladas y precisas.

7. Recomendaciones

La continuidad de trabajos similares y el fortalecimiento institucional en torno a la gestión del riesgo hídrico pueden beneficiarse de las siguientes orientaciones derivadas de los resultados obtenidos en esta investigación.

Actualizar periódicamente la base topográfica empleada en los modelos resulta fundamental, especialmente en zonas sujetas a procesos de urbanización o transformación del uso del suelo. La incorporación de sensores LiDAR en futuras campañas puede mejorar la detección de microrelieves y elementos verticales urbanos, fortaleciendo la precisión del modelo digital de terreno.

La integración de modelos hidrodinámicos con redes de monitoreo en tiempo real y plataformas de pronóstico meteorológico representa una oportunidad para avanzar hacia sistemas de alerta temprana más eficientes y proactivos. Para ello, resulta clave contar con infraestructura adecuada, disponibilidad de datos confiables y personal técnico capacitado en el manejo e interpretación de modelos numéricos.

Estandarizar y documentar los procesos de adquisición, procesamiento y modelación mejora la trazabilidad metodológica y facilita la replicación de esta experiencia en otras localidades. El uso de software y hardware de código abierto constituye una estrategia eficaz para extender el alcance de estas tecnologías en municipios con capacidades limitadas.

Incorporar mecanismos participativos de validación, como encuestas comunitarias o mapeo colaborativo, permite complementar las fuentes instrumentales de datos en contextos donde los registros son escasos o inexistentes. Este enfoque favorece no solo la calibración de los modelos, sino también la apropiación del conocimiento por parte de la comunidad.

Una limitación importante del estudio corresponde a la imposibilidad de contar con información confiable para la validación independiente de los modelos hidrodinámicos, por lo cual el análisis se centró en un único evento histórico bien documentado. Futuras investigaciones podrían incorporar registros instrumentales o productos satelitales para avanzar hacia procesos de validación más robustos.

Dada la disponibilidad de información hidráulica para el evento analizado, la condición de borde aguas abajo fue definida mediante la pendiente normal del cauce. Esta elección, habitual en estudios hidrodinámicos, presenta ciertas limitaciones en escenarios de crecidas extraordinarias, las cuales deberán ser tenidas en cuenta en la interpretación de los resultados.

Para el evento de inundación analizado (año 2012) no fue posible identificar imágenes satelitales, ni de tipo radar ni ópticas, con cobertura temporal y espacial adecuada que permitieran evidenciar la magnitud del evento y confirmar su impacto. En este contexto, la contrastación de los resultados se realizó a partir de la información de campo disponible y de la consistencia hidráulica del modelado implementado. Esta situación pone de manifiesto una limitación asociada a la disponibilidad de información remota para eventos históricos, la cual deberá ser considerada en la interpretación de los resultados.

Si bien la información disponible permitió definir un conjunto de 21 secciones transversales a lo largo del arroyo del Azul, este número resulta limitado para representar con alto nivel de detalle la variabilidad geométrica y el comportamiento hidráulico del cauce en todo su desarrollo, particularmente en sectores con cambios abruptos de sección, presencia de estructuras y

variaciones locales de pendiente. En consecuencia, la representación del flujo se ve condicionada por la discretización espacial adoptada, lo cual introduce una fuente de incertidumbre en la simulación hidráulica. En estudios posteriores se recomienda ampliar la cantidad de secciones transversales y complementar esta información con levantamientos topográficos adicionales de alta resolución, de manera que el modelo pueda capturar con mayor precisión las condiciones locales del cauce y mejorar la robustez de los resultados.

El enfoque metodológico adoptado en este trabajo difiere del procedimiento recomendado en el estado del arte de la modelación hidrodinámica, el cual se basa en la calibración de parámetros hidráulicos —como los coeficientes de rugosidad y otros términos asociados a la difusión turbulenta y flujos secundarios— a partir de eventos de inundación históricos bien documentados, que permiten definir una condición de referencia claramente identificable. Idealmente, este proceso debería realizarse de manera independiente para cada modelo, considerando posteriormente otros eventos para evaluar la capacidad de validación bajo condiciones no conocidas.

En el caso particular de la ciudad de Azul, no se dispone de registros hidráulicos detallados ni de eventos de inundación posteriores al año 2012 que permitan llevar a cabo un proceso de calibración y validación formal bajo este esquema. Asimismo, la información recopilada mediante encuestas a la población, si bien aporta un valor cualitativo relevante sobre la percepción del impacto de las inundaciones, no permitió establecer una correlación robusta entre las alturas de agua reportadas y las simuladas, debido a la inherente imprecisión espacial y temporal de este tipo de datos. En consecuencia, el ajuste de los coeficientes de rugosidad se realizó a partir de un único modelo, manteniéndose dichos valores constantes en el segundo modelo con fines comparativos,

reconociendo que las diferencias en las mallas computacionales, los esquemas de discretización y los solucionadores numéricos introducen limitaciones adicionales en la comparación directa de resultados.

Estas restricciones metodológicas implican que los resultados obtenidos deben ser interpretados principalmente en términos de consistencia hidráulica y tendencias generales de comportamiento, más que como una calibración cuantitativa estricta de los modelos. No obstante, el análisis comparativo realizado permite identificar diferencias y similitudes relevantes entre ambos enfoques de modelación, aportando información útil para la comprensión de la dinámica de inundación en la ciudad de Azul. En estudios futuros, la disponibilidad de registros de eventos recientes con información hidrométrica confiable permitiría aplicar esquemas de calibración y validación más robustos, ajustados de manera independiente a cada modelo, fortaleciendo la aplicabilidad operativa de los resultados.

Finalmente, los modelos desarrollados deben considerarse como herramientas no sólo para la respuesta ante emergencias, sino también para la planificación territorial, la identificación de zonas críticas y la evaluación de escenarios futuros bajo condiciones de cambio climático o de expansión urbana. Su uso en la gestión preventiva del riesgo puede aportar insumos clave para la toma de decisiones estratégicas a escala local y regional.

8. Referencias bibliográficas.

- Amarís Castro, G. E., Guerrero Barbosa, T. E., & Sánchez Ortiz, E. A. (2015). Comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant en 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en régimen permanente y variable. *Tecnura*, 19(45), 75–88. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a06>
- Antico, P., y Sabbione, N. (2010). Variabilidad temporal de la precipitación en la ciudad de La Plata durante el período 1909-2007: tendencias y fluctuaciones cuasiperiódicas. *Geoacta*, 35, 44-44.
- Bárcena, A., Prado, A., Samaniego, J., y Pérez, R. (2014). Manual para la Evaluación de Desastres (CEPAL NACIONES UNIDAS).
- Belt, C. (1975). The 1973 Flood and Man's Constriction of the Mississippi River. *Science*, 198(4204), 681-684. <https://doi.org/10.1126/science.189.4204.681>
- BID. (2012). Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia 2010-2011.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez, E., Dolz, J., y Coll, A. (2014). IBER: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingeniería*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bladé, E., Gómez, M., Dolz, J., Piazzese, J., Oñate, E., Corestein, G., y Sánchez, M. (2014). Modelización bidimensional del flujo en lamina libre en aguas poco profundas (CEDEX, Ed.). <http://www.jorgesanchez.net/web/css1.pdf>
- Brunner, G. W. (2016a). HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Version 5.0. CPD-68A, 1-171.
- Brunner, G. W. (2016b). Manual del usuario del sistema de análisis de ríos HEC-RAS [HEC-RAS River Analysis System User ' s Manual]. February, 960.
- Brunner, G. W. (2020). *Hydraulic Reference Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/latest/front-matter>
- Cazenave, I. G. (2012). Inundación 18 de mayo de 2012 en la ciudad de Azul.
- CCHE. (2003). CCHE2D-Flow (pp. 1-130). <https://www.ncche.olemiss.edu/cche2d-flw-model/>
- Ceballos, A., Baró, J., y Díaz, C. (2016). Estimación de pérdidas económicas directas provocadas por inundación. Aplicación de las curvas inundación-daños en países en desarrollo. *Investigaciones Geográficas*, 65, 169-180. <https://doi.org/10.14198/ingeo2016.65.10>

- CENAPRED. (2008). Características e impactos socioeconómicos de los principales desastres en la República Mexicana en el año 2008. Serie: Impacto socioeconómico de los desastres en México. Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2020). Impacto socioeconómico de los desastres en México. CENAPRED, Gobierno de México.
- Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetección espacial. En E. R. Sa (Ed.), (Fundamentals of remote sensing from space (2.a ed.).
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2021). *Desastres y desigualdad en América Latina y el Caribe*. CEPAL.
- Collazos, G., Villanueva, I., Briseño, N., Cazenave, G., Guevara, Cristian., y Blanco, M. (2018). Modelo bidimensional de inundación urbana de la ciudad de azul (argentina) con herramientas de uso libre. XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Cunge, J. A. (1969). On the subject of a flood propagation computation method. *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), 205–230. <https://doi.org/10.1080/00221686909500264>.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2021). *Desastres y desigualdad en América Latina y el Caribe*. CEPAL. <https://www.cepal.org/>
- Delgado, A. (2016). Modelización 1D, 1D/2D y 2D de la inundabilidad en el meandro de Sant Boi de Llobregat mediante la nueva aplicación Hec-ras 5.0. UPC Barcelona Tech.
- Deltares. (2014). 3D/2D Modeling suite for integral water solution Delft3D User Manual. 1-710.
- DHI. (2019a). Mike 11 (pp. 1-120). <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-11>
- DHI. (2019b). Mike 21 (pp. 1-144). https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/M21HD.pdf
- Ekhtari, N., y Sahebi, M. (2008). Automatic building detection from LIDAR point cloud data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/4_pdf/84.pdf
- Evans, Lawrence. C. (2010). *Partial Differential Equations: Second Edition (Graduate Studies in Mathematics)* (American Mathematical Society, Ed.; 2nd ed., Vol. 19).
- García-Feal, O., González-Cao, J., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Domínguez, J. M., & Formella, A. (2018). An accelerated tool for flood modelling based on Iber. *Water*, 10(10), 1459. <https://doi.org/10.3390/w10101459>

- Guevara, C., Briceño, N., Zimmermann, E., Vives, L., Blanco, M., Cazenave, G., y Ares, G. (2017). Relleno de series de precipitación diaria para largos períodos de tiempo en zonas de llanura. Caso de estudio cuenca superior del arroyo del azul. *Geoacta*, 42(1), 38-62 (ISSN 1852-7744).
- Guevara, C., Masson, I., Cazenave, G., Vives, L., y Amábile, G. (2019). A novel approach for the integral management of water extremes in plain areas. *Hydrology*, 6(3). <https://doi.org/10.3390/hydrology6030070>
- Guevara, C., Vives, L., Zimmermann, E., Masson, I., Fajardo, L., y Scioli, C. (2019). Analysis and correction of digital elevation models for plain areas. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 85(3), 209-219. <https://doi.org/10.14358/PERS.85.3.209>
- Haces-García, G., et al. (2023). Deep learning-based hydrodynamic modeling for real-time flood forecasting. arXiv preprint arXiv:2305.12052.
- Hermelin, M. (2005). *Desastres de Origen Natural en Colombia 1979–2004* (Eafit, Ed.).
- Hodges, B. R., y Madadi-kandjani, E. (2019). Parallel code and cloud computing for water resources – building models for the next generation of computers. June, 17-20.
- Hollis, G. (1975). The effect of urbanization on floods of different recurrence interval. *AGU100*, 11(3), 431-435. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/WR011i003p00431>.
- IDEAM–INTA. (2022). *Eventos hidrometeorológicos extremos y su impacto en regiones de llanura del Cono Sur*.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2022). *La Niña 2021–2022: Impactos hidrometeorológicos en Colombia*. IDEAM.
- INDEC. (2010). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010*.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria & Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2022). *Eventos hidrometeorológicos extremos y su impacto en regiones de llanura del Cono Sur*. INTA–IDEAM.
- Inter-American Development Bank. (2019). Hydro-bid flood (pp. 1-255). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18235/0001718>
- Jaramillo Baltra, R., y Padró García, J. C. (2020). Generación de cartografía a partir de imágenes captadas con dron de ala fija, asociada a proyectos hidráulicos fluviales. *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 93-117. <https://doi.org/10.21138/gf.680>

- Kuppel, S., Houspanossian, J., Noretto, M., y Jobbágy, E. (2015). What does it take to flood the Pampas?: Lessons from a decade of strong hydrological fluctuations. *Water Resour*, 51, 2937-2950. <https://doi.org/10.1002/2015WR016966>
- Kramer, S. C., y Stelling, G. S. (2008). A conservative unstructured scheme for rapidly varied flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 58(2), 183–212. <https://doi.org/10.1002/flid.1722>
- Kreienkamp, F., Philip, S. Y., Tradowsky, J. S., Kew, S. F., Lorenz, P., Arrighi, J., ... Otto, F. E. L. (2021). Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. *World Weather Attribution*. <https://www.worldweatherattribution.org/rapid-attribution-of-heavy-rainfall-events-leading-to-the-severe-flooding-in-western-europe-during-july-2021/>
- Langhammer, J., y Vacková, T. (2018). Detection and Mapping of the Geomorphic Effects of Flooding Using UAV Photogrammetry. *Pure and Applied Geophysics*, 175(9), 3223-3245. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1874-1>
- Llulén, W; Balde, E. (2005). 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(3), 1-10. <https://doi.org/10.1002/rra.775>
- Longley. Paul, Goodchild. Michael, Maguire. David, & Rhind. David. (2005). *Geographic Information Sistem and Science* (2nd ed.). Wiley.
- Mihu, A., Cîmpianu, C., Stoleriu, C., Pérez, M., y Paveluc, L. (2019). Using high-density LiDAR data and 2D streamflow hydraulic modeling to improve urban flood hazard maps: A HEC-RAS multi-scenario approach. *Water (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/w11091832>.
- Minotti, P., Vargas, W. M., & López, F. (2021). Inundaciones en la región pampeana: recurrencia, impactos y desafíos para la gestión del riesgo. *Revista de la Asociación Argentina de Recursos Hidricos*, 28(2), 45–60.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- NASA. (2008). *Examining Spatial (Grid) convergence*. <https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html>.

- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021). Billion-dollar weather and climate disasters: Overview. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://www.ncei.noaa.gov/access/billions/>
- Neal, J., Schumann, G., y Bates, P. (2012). A subgrid channel model for simulating river hydraulics and floodplain inundation over large and data sparse areas. *Water Resources Research*, 48(11), 1-16. <https://doi.org/10.1029/2012WR012514>
- Neal, J., Hawker, L., Savage, J., Durand, M., Bates, P., & Sampson, C. (2021). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 136, 104949. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104949>
- Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., Tóth, T., & Di Bella, C. (2020). *The effects of land use change on water table dynamics in the Pampas*. *Journal of Hydrology*.
- Ojea, M. (2014, octubre 1). Las inundaciones, el fenómeno natural más caro para Argentina. *El Pais*.
- OpenDoneMap. (2019). *OpenDoneMap User manual*. 0.9.9. <https://docs.opendronemap.org/installation.html#step-1-check-virtualization-support>
- Peluso, F., Usunoff, E., Bidegain, A. (1999). 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, COPROCNA*, 269-278.
- Pérez, C. (2004). El mundo rural latinoamericano y la nueva ruralidad. *Nómadas*, 20, 180-193.
- Pfster, L., Kwadjik, J., y Musy, A. (2004). Climate change, land use change and runoff prediction in the Rhine–Meuse basins. *Geoscience Data Journal*, 20(3), 229-241. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/rra.775>
- Pinos, J., y Timbe, L. (2019). Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering*, 12(1), 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.03.001>
- Rahimzadeh O, Bahreman A, Noura N, Mukolwe M. Evaluating flood extent mapping of two hydraulic models, 1D HEC-RAS and 2D LISFLOOD-FP in comparison with aerial imagery observations in Gorgan flood plain, Iran. *Natural Resource Modeling*. 2019; 32:e12214. <https://doi.org/10.1111/nrm.12214>
- Restas, A. (2018). Water Related Disaster Management Supported by Drone Applications. *World Journal of Engineering and Technology*, 06, 116-126. <https://doi.org/10.4236/wjet.2018.62b010>

- Rincón, J., Pérez, M., Delfín, G., Freitez, C., y Martínez, F. (2017). Análisis Comparativo Entre Los Modelos Hec-Ras E IBER En La Evaluación Hidráulica De Puentes. *Revista Gaceta Técnica*, 17(171), 9-28. <https://doi.org/https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18178.68809>
- Rtklib. (2019). User Manual rtklib 2.4.3. 1-183. http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf
- Marcos Sanz-Ramos, David López-Gómez, Ernest Bladé, Danial Dehghan-Souraki (2023). A CUDA Fortran GPU-parallelised hydrodynamic tool for high-resolution and long-term eco-hydraulic modelling, *Environmental Modelling & Software*, Volume 161, 2023, 105628, ISSN 1364-8152, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105628> .
- Sánchez, E. (2015). Modelación precipitación escorrentía en cuencas urbanas-caso de estudio: Distrito de Carmen Alto. Universidad Nacional San Cristóbal de Humanga.
- Sanders, B. F., Schubert, J. E., & Gallegos, H. A. (2021). Advances in urban flood modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(2), e1501. <https://doi.org/10.1002/wat2.1501>.
- Schubert, J. E., Sanders, B. F., Smith, M. J., & Wright, N. G. (2022). Uncertainty and sensitivity in flood inundation modelling using high-resolution topographic data. *Journal of Hydrology*, 603, 127145. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127145>.
- Skrede, T., Muthanna, T., y Alfrendsen, K. (2020). Applicability of urban streets as temporary open floodways. *Hydrology Research*, 1-14. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.131>
- Thanh, P., y Kappas, M. (2017). Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18(1). <https://doi.org/10.3390/s18010018>
- Versteeg, H. K., y Malalasekera, W. (s. f.). (2007) *An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition*. www.pearsoned.co.uk/versteeg

9. Anexos.

Anexos.-1 Ecuaciones hidrodinámicas

Los modelos hidrodinámicos 2D resuelven las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad o conocidas en inglés como “2D Shallow Water Equations (2D-SWE)” o ecuaciones bidimensionales de Saint Venant. Estas ecuaciones parten del supuesto de una presión hidrostática uniformemente distribuida al igual que la velocidad (Bladéet al., 2014).

Las ecuaciones de Sain Venant 2D se representan de la siguiente manera:

$$\bar{U} = (h, hU_x, hU_y)^T \text{ Ecuación Anexos.-7}$$

$$\bar{F} = (hU_x, hU_x^2 + \frac{1}{2}gh^2, hU_xU_y)^T \text{ Ecuación Anexos.-8}$$

$$\bar{G} = (hU_y, hU_yU_x, hU_y^2 + \frac{1}{2}gh^2)^T \text{ Ecuación Anexos.-9}$$

$$\bar{H} = (0, gh(So_x - Sf_x), gh(So_y - Sf_y))^T \text{ Ecuación Anexos.-10}$$

Donde:

h : tirante

U_x : velocidad en el sentido x (m/s)

So_x : pendiente en el sentido de x

Sf_x : pendiente de fricción en el sentido de x

g : constante de la gravedad (m/s²)

U_y : velocidad en el sentido y (m/s)

So_y : pendiente en el sentido de y

Sf_y : pendiente de fricción en el sentido de y

De acuerdo con Neal et al. (2012), la ecuación de la onda difusiva se puede describir a partir de la cantidad de movimiento agua para el volumen de control en cada una de las celdas, teniendo como punto de partida las ecuaciones de Saint Venant, las cuales para el caso de una dimensión se representan por la siguiente fórmula:

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta(\frac{Q^2}{A})}{\delta x} + gA \frac{\delta(Z_b+h)}{\delta x} + S_f = 0 \text{ Ecuación Anexos.-11}$$

Donde:

Q : es la descarga (m^3/s) $Q = Av$

Z_b : es el nivel del terreno (m)

S_f es la pendiente de fricción

A : es el área (m^2)

h es la profundidad de agua (m)

g : constante de gravedad (m/s^2)

Lo anterior es equivalente a:

$$S_f = -gA \frac{\delta(Z_b+h)}{\delta x} \text{Ecuación Anexos.-12}$$

Al vincular S_f con la formula empírica de rugosidad de Manning se obtiene la siguiente formulación la cual puede ser aplicada tanto en 1D y 2D:

$$S_f = n^2 \frac{|Q|}{A^2 R^{4/3}}, S_{f_{x,y}} = n^2 \frac{U_{x,y} \sqrt{U_x^2 + U_y^2}}{h^{4/3}} \text{Ecuación Anexos.-13}$$

Anexo -2 Métodos numéricos empleados

Para la resolución del conjunto de las ecuaciones diferenciales bidimensionales de Saint Venant es necesario aplicar métodos numéricos. Para el caso de IBER el método empleado es el de volúmenes finitos (Bladé, E. et al., 2014) , mientras que HEC-RAS utiliza de manera combinada volúmenes finitos y diferencias finitas (Brunner, 2016b).

El parámetro CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) es un número adimensional utilizado en la simulación numérica de ecuaciones de convección para determinar la estabilidad de un esquema de discretización. Este parámetro está relacionado con la velocidad de propagación de la información en el dominio y el tamaño de los pasos de tiempo y espaciales utilizados en la simulación.

En esencia, el número CFL establece una relación entre la velocidad de la onda característica en el sistema y el tamaño de la malla y el paso de tiempo en el modelo numérico. Para garantizar la estabilidad de la simulación, se requiere que el número CFL sea menor o igual a 1 en la mayoría de los casos. Cuando el número CFL excede 1, puede producirse inestabilidad numérica en la simulación.

En el contexto de la dinámica de fluidos computacional (CFD) y la hidrodinámica, el número CFL se utiliza para determinar los límites de estabilidad de los esquemas de discretización utilizados para resolver ecuaciones de movimiento como las ecuaciones de Navier-Stokes.

Para simulaciones de grandes períodos de tiempo, el modelo hidrodinámico HEC-RAS recomienda el uso del solucionador de ecuaciones de aguas poco profundas con aproximación semi-lagrangiana para los términos de aceleración de la ecuación de momento (ELM-SWE). Existe un enfoque alternativo (EM-SWE) que aplica una discretización conservadora estricta del momento (Kramer y Stelling, 2008). Este último solucionador requiere que la cuadrícula 2D sea estrictamente ortogonal y que el paso de tiempo esté limitado por la condición de Courant-Friedrichs-Lewy (Brunner, 2020), con $CFL \leq 1$.

$$\Delta t_{x,y} = CFL \frac{\Delta x,y}{|u_{x,y}| + \sqrt{gh}} \text{Ecuación Anexos.-14}$$

$$\Delta t = \min(\Delta t_x, \Delta t_y)_{\Omega} \text{Ecuación Anexos.-15}$$

Donde:

$\Delta t_{x,y}$: paso de tiempo de simulación

g : aceleración de la gravedad

$\Delta x, y$: tamaño de mallado

Δt_y : paso de tiempo en la dirección y

Δt_x : paso de tiempo en la dirección x

Ω : dominio cartesiano ortogonal.

Anexo -3 Mallado de los modelos

En la mecánica de fluidos computacional, se manejan distintos tipos de mallados que permitan dar solución al método numérico empleado y permiten la resolución de las ecuaciones de Saint Venant o de Navier Stokes, estos mallados son: estructurado, no estructurado, mallas híbridas o por bloques (Versteeg y Malalasekera, (2007)).

Un mallado estructurado se puede entender como un entorno unidimensional dividido en celdas de tal manera que se pueda seguir un orden secuencial de celdas. En este arreglo estructurado, cada celda se encuentra adyacente a la siguiente y a la anterior de forma contigua. Esta disposición facilita la extracción de la conectividad de las celdas según su posición en la memoria: el elemento n del vector corresponde al valor almacenado en la celda n . Este sistema optimiza el uso de la memoria durante los cálculos y es aplicable tanto a interpretaciones en 2D como en 3D, donde las celdas pasan de ser cuadriláteros a hexaedros.(Versteeg y Malalasekera, 2007).

Cuando la conectividad de las celdas no es trivial, la malla es no estructurada, generando la necesidad de calcular la información de conectividad entre celdas y guardarla en estructuras de datos. Conllevando a cálculos menos eficiente y ocupando un mayor espacio en la memoria que un mallado estructurado (Versteeg y Malalasekera (2007),

A pesar de que las mallas estructuradas representan un uso optimizado de la memoria, no es fácil adaptarlas a geometrías complejas (zonas con meandros, estructuras hidráulicas, etc.). El proceso de mallado para este caso requiere de mucha interacción humana, haciendo que este proceso sea tedioso y muchas veces ineficiente. Por otro lado, las mallas no estructuradas son fácilmente automatizables y permiten adaptarse a geometrías complejas reduciendo así el tiempo requerido para su obtención (NASA, 2008).

Un dominio puede tener distintos tipos de mallado, teniendo mallas por bloques y mallas híbridas, estas mallas pueden clasificarse en dos tipos:

Conformes: las caras y nodos de las caras de un bloque coinciden con las del otro.

No conformes: las caras y nodos de las caras de cada bloque no coinciden, en este caso es necesaria una interpolación en la solución del flujo entre cada bloque (Versteeg y Malalasekera, (2007)).

En el caso del modelo 2D HEC-RAS, usa fundamentalmente un mallado no estructurado de celdas cartesianas con cálculo sub-grid de relación cota-volumen en cada celda y un esquema temporal implícito. Por otro lado, el modelo 2D IBER usa un mallado triangular no estructurado, con un esquema temporal explícito sujeto al criterio de Courant-Friedrichs-Lewy. A su vez HEC-RAS incorpora un solver de las ecuaciones de onda difusiva o inercial que puede ser útil en el caso de inundaciones lentas (Brunner, 2020).

Anexo -4 Paso de tiempo para resolver las ecuaciones de Saint Venant con HEC-RAS e IBER

La evolución temporal en las ecuaciones en derivadas parciales (EDP) de primer orden e hiperbólicas desempeña un papel fundamental en el análisis de fenómenos físicos y matemáticos.

Estas EDP modelan sistemas dinámicos donde las soluciones varían con respecto al tiempo y exhiben comportamientos propagativos. El estudio del paso del tiempo en las EDP hiperbólicas permite comprender la propagación de ondas, la interacción entre diferentes variables y la evolución de fenómenos físicos complejos. Es crucial comprender y caracterizar adecuadamente este aspecto temporal para obtener soluciones precisas y comprensivas de las EDP hiperbólicas y su relevancia en diversos campos científicos (Evans, 2010).

Diferentes esquemas de discretización de las ecuaciones en derivadas parciales parten de aproximaciones tipo:

$$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} \text{Ecuación Anexos.-16}$$

Donde:

u : velocidad flujo (m/s)

t : Tiempo (s)

u^{n+1} : velocidad en la posición n+1

u^n : velocidad en el instante n

que permiten su resolución, por ejemplo, el caso más sencillo de balance puntual, escrito como:

$$\frac{dU}{dt} = H(U, t) \text{Ecuación Anexos.-17}$$

Donde:

H : altura de la lámina de agua (m)

se resuelve, en discretización temporal explícita de Euler, como:

$$U^{n+1} = U^n + \Delta t H(U^n, t^n) \text{Ecuación Anexos.-18}$$

de forma implícita, como.

$$U^{n+1} = U^n + \Delta t H(U^{n+1}, t^{n+1}) \text{Ecuación Anexos.-19}$$

O la combinación semi-implícita:

$$U^{n+1} = U^n + \Delta t [(1 - \theta)H(U^n, t^n) + \theta H(U^{n+1}, t^{n+1})] \text{Ecuación Anexos.-20}$$

Con el parámetro de peso:

$$0 \leq \theta \leq 1 \text{Ecuación Anexos.-21}$$

Para resolver las EDP, especialmente las de primer orden hiperbólicas,

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = 0 \text{Ecuación Anexos.-22}$$

se requiere relacionar cuidadosamente los cocientes entre Δx y Δt , ello se deduce al transformar la EDP a notación característica, con

$$\Lambda = \frac{\partial F}{\partial U} \text{Ecuación Anexos.-23}$$

y puede reescribirse como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \Lambda \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \text{Ecuación Anexos.-24}$$

de la que se deduce una condición necesaria de convergencia, que aplicando el teorema de Lax, si la discretización es consistente, afirma que la condición necesaria y suficiente de convergencia, es la estabilidad, que se logra mediante:

De modo que en discretización explícita el criterio CFL debes ser menor o igual a 1, para 1 garantizar estabilidad de la simulación, mientras en la discretización implícita el criterio CFL permite valores superiores a 1.

$$\frac{\Delta t \lambda_{max}}{\Delta x} \leq CFL; \Delta t \leq CFL \frac{\Delta x}{\lambda_{max}} \text{Ecuación Anexos.-25}$$

Donde:

CFL : coeficiente originalmente definido por Courant Friedrichs y Lewy en 1928, λ_{max} : el autovalor máximo de la matriz A .

En el esquema explícito, es fundamental que el paso temporal Δt , sea inferior al tiempo que tarda la onda más rápida en desplazarse a través de una celda de tamaño Δx , Esto se debe a que el valor de U_i^{n+1} e determina en función de los valores $(U_{i-1}^n, U_i^n, U_{i+1}^n)$,

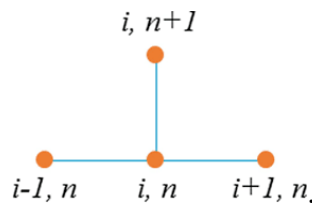


Figura 9-1 Plantilla explícita.

En una discretización implícita el valor de U_i^{n+1} se define a través de los valores $(U_{i-k}^n, \dots, U_{i-1}^n, U_i^n, U_{i+1}^n, \dots, U_{i+k}^n)$ y $(U_{i-k}^{n+1}, \dots, U_{i-1}^{n+1}, U_i^{n+1}, U_{i+1}^{n+1}, \dots, U_{i+k}^{n+1})$, que es una relación más compleja algebraicamente, y se resuelve por medio de iteraciones, pero en teoría es incondicionalmente estable. Véase la plantilla de la Figura 9-2

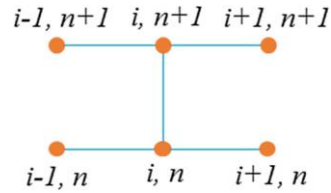


Figura 9-2 Plantilla implícita de Crank-Nicolson.

En la práctica, al usar discretización implícita con CFL altos, se añade difusión numérica o viscosidad artificial que atenúa las ondas, y se pierde precisión, por lo que es necesario encontrar un CFL de compromiso entre celeridad y precisión, siguiendo a Cunge, 1996.

Anexo -5 Aplicación a las ecuaciones de Saint Venant:

En una dimensión los valores locales de propagación para las ondas son $(u-c, u+c)$, con u velocidad del flujo y c su celeridad, definida como

$$c = \sqrt{gh} \text{Ecuación Anexos.-26}$$

(g constante de gravedad, y h tirante)

De modo que el máximo es $u+c$, y se tiene por ello:

$$\Delta t = CFL \frac{\Delta x}{u+c} \text{Ecuación Anexos.-27}$$

En dos dimensiones (X, Y), los valores locales de propagaciones son $(u-c, u, u+c)$, y el paso de tiempo sigue el criterio:

$$\Delta t_{x,y} = CFL \frac{\Delta x,y}{u_{x,y}+c} \text{Ecuación Anexos.-28}$$

$$\Delta t_{2D} = \text{Min}(\Delta t_x, \Delta t_y)_{\Omega} \text{Ecuación Anexos.-29}$$

Donde Ω representa el dominio computacional entero.

Anexo Anexos.-6 Consideraciones sobre la optimización de velocidad de cálculo con HEC-RAS e IBER:

Criterio CFL-min y CFL-max de HEC-RAS:

Particularmente HEC-RAS, define el *CFL* local, que en caso de una celda cuadrangular (*i, j*) sería:

$$CFL_{i,j} = \Delta t \text{Max} \left(\frac{u_x \sqrt{c}}{\Delta x}, \frac{u_y \sqrt{c}}{\Delta y} \right)_{i,j} \text{ Ecuación Anexos.-30}$$

Y los valores umbrales *CFL-min* y *CFL-max*, de modo que el criterio del paso de tiempo se regula según:

Si todas las celdas, presentan valor de *CFL* por debajo de *CFL-min*, el paso de tiempo Δt se duplica.

Si una celda, presenta un valor de *CFL* por encima de *CFL-max*, el paso de tiempo Δt se divide por 2.

A su vez puede decidirse el número de pasos consecutivos en los que se permite violar la condición de *CFL-min* antes de multiplicar por 2 el paso de tiempo Δt , y el número máximo de pasos de duplicado y el máximo de división por 2, ver links de HEC-RAS en la bibliografía.

IBER, código explícito, usa por defecto un valor $CFL=0.45$, y de acuerdo a lo expuesto en la teoría general de la sección anterior, puede aumentarse hasta un valor máximo de 1.

IBER en sus últimas versiones, actualmente 3.3.0, salida en mayo de 2023, habilita dos opciones de cálculo para uso exclusivo con tarjetas gráficas o GPU (IberPlus y R-IBER), de modo que se acelera su ejecución notablemente, hasta dos órdenes de magnitud (> 100), según el caso y la tarjeta GPU utilizada, Sanz-Ramos et al., 2023.

9.1. Secciones transversales de topografía.



Figura 9-3 Perfiles topográficos.

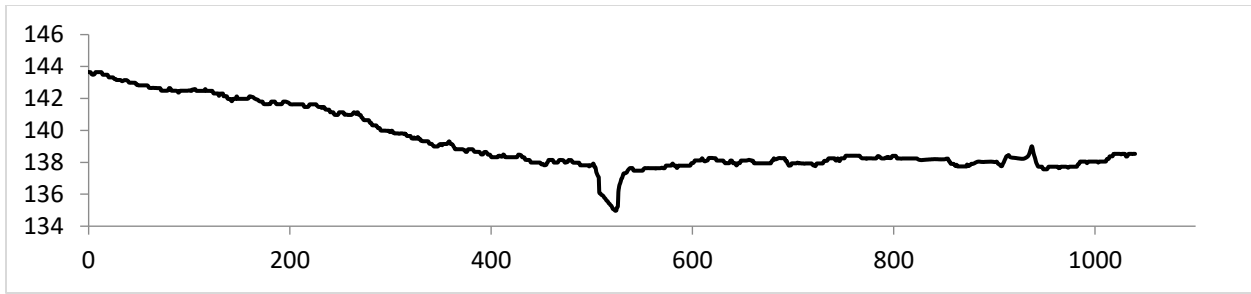


Figura 9-4 Perfil B-B'

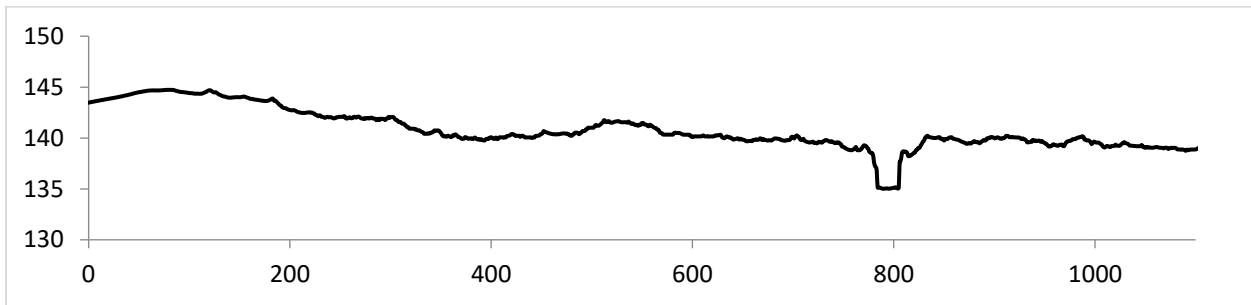


Figura 9-5 Perfil C-C'

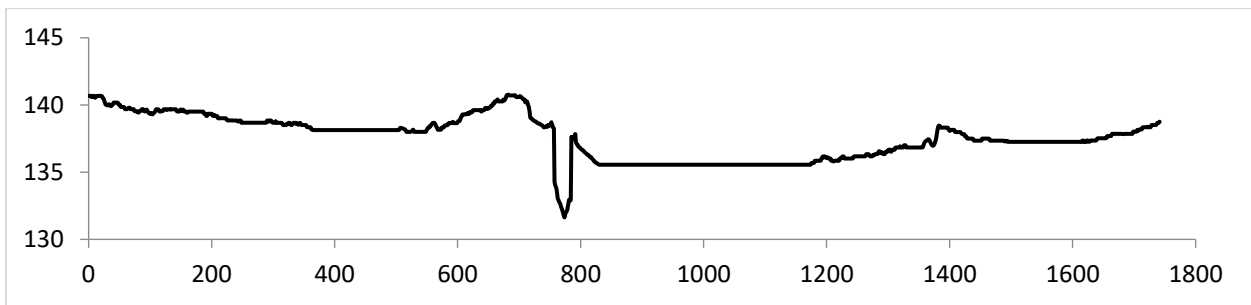


Figura 9-6 Perfil D-D'

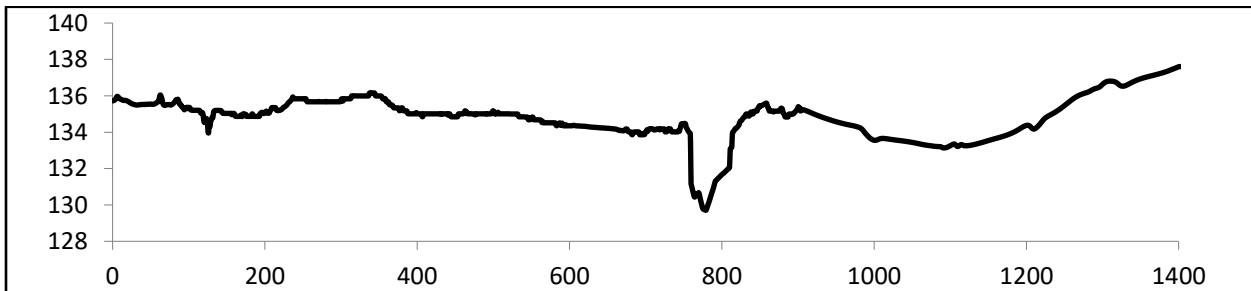


Figura 9-7 Perfil E-E'

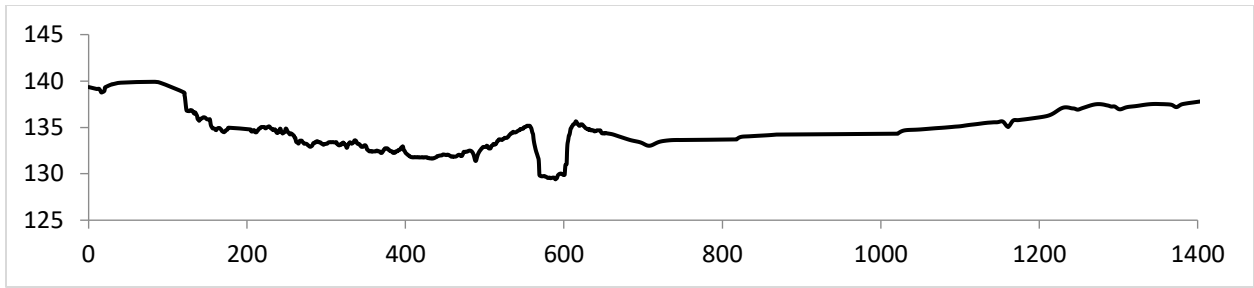


Figura 9-8 Perfil F-F'

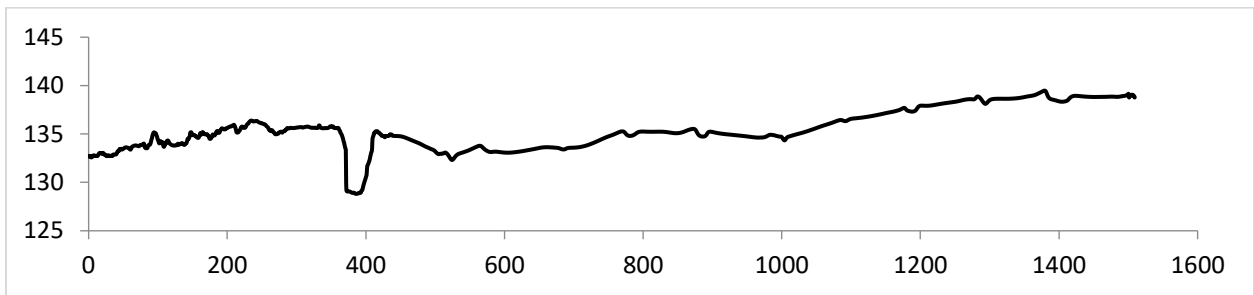


Figura 9-9 Perfil G-G'

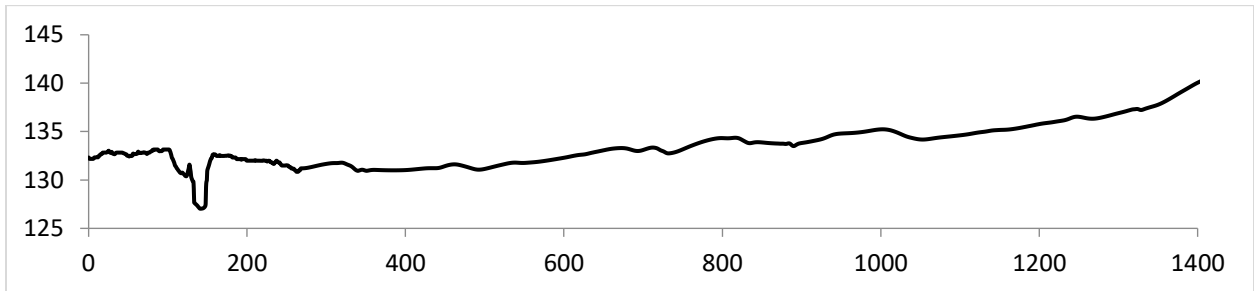


Figura 9-10 Perfil H-H'

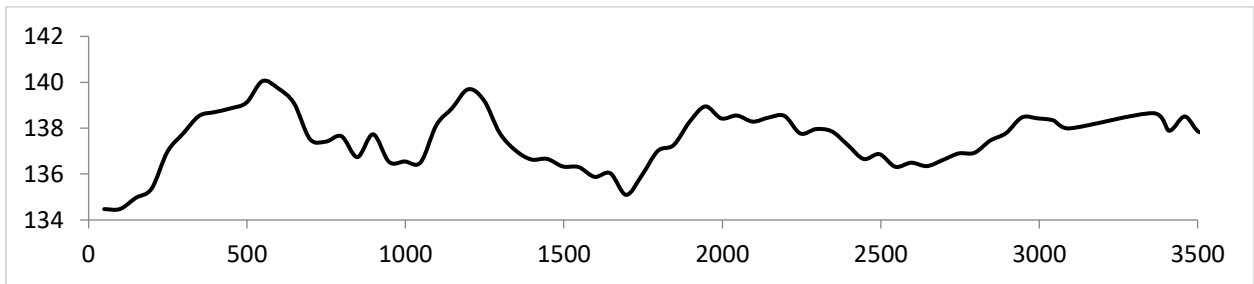


Figura 9-11 Perfil I-I'

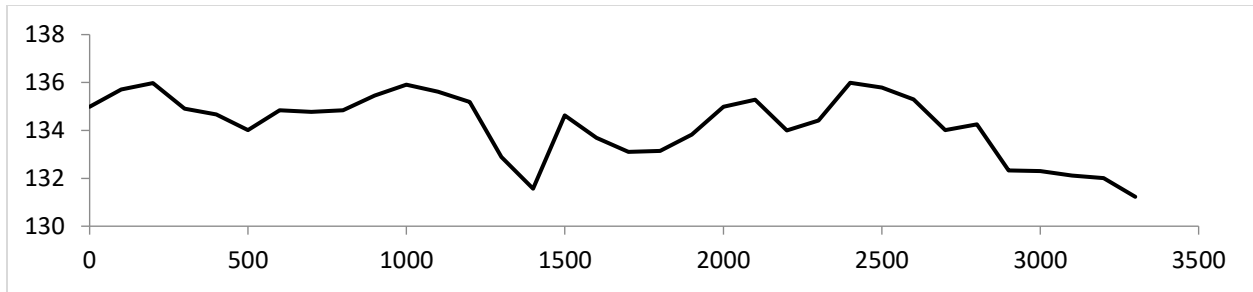


Figura 9-12 Perfil J-J'

Anexo -7 Código de clasificación de imágenes Sentinel en Google Earth Engine

```

var imagee = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
  .filterMetadata('CLOUD_COVERAGE_ASSESSMENT', 'less_than', 10)
  .filterBounds(geometry)
  ;
var dem=ee.Image("USGS/SRTMGL1_003");
//-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
print (imagee);
var imag=imagee.mean();
var visParams = {bands: ['B4', 'B3', 'B2'], max: 3048, gamma: 1};
//-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
var NDVI = imag.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('NDVI');//calcula en NDVI
var composite=imag.addBands(NDVI);//Agrega el NDVI a la imagen promedio
var bandexport= composite.select('B2','B3','B4');
//-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
//Lista de funciones y procesos para entrenar elclasificador
var bands= ['B2','B3','B4','B8','NDVI','B11','B6'];
var newfeatcol = Pastos_cortos.merge(Concreto).merge(suelo_desnudo).merge(arboles).merge(agua);
var training = composite.select(bands).sampleRegions({
collection: newfeatcol,
properties: ['landcover'],
scale: 10
});
var classif = ee.Classifier.smileRandomForest(10).train({
features: training,

```

```

classProperty: 'landcover',
inputProperties: bands
});
var clasifed= composite.select(bands).classify(classif);
//-----*
var trainAccuracy = classif.confusionMatrix();
print('Resubstitution error matrix: ', trainAccuracy);
print('Training overall accuracy: ', trainAccuracy.accuracy());
//-----*
//mostrar imagenes
Map.addLayer(NDVI,{},'NDVI');
Map.addLayer(dem,{},'dem');
Map.addLayer(bandexport,visParams,"comp");
Map.addLayer(imag,visParams,"VIS");
Map.addLayer(clasifed,{min: 1, max: 5, palette: [' #8adc6f ', ' #cc4933 ', '#cbce52','1c5716',' #14179c
'],'clasifed');
//-----*
Export.image.toDrive({
  image:dem,
  fileNamePrefix:'dem',
  region:geometry2,
});
Export.image.toDrive({
  image:clasifed,
  fileNamePrefix:'clas',
  region:geometry2,
});
//-----*
var Etiquetas = [
  'Pastos',
  'Urbano',
  'Suelo desnudo',
  'Bosques',
  'Agua'];
var Titulo = ui.Label({
  value: 'Clases',
  style: {fontWeight: 'bold', fontSize: '20px', margin: '0px 0px 15px 0px'}});

```

```

var Leyenda = ui.Panel({
    style: {position: 'bottom-left', padding: '10px 20px'}});
Leyenda.add(Titulo);
var Simbologia = ['4EE819', 'CF3520', 'E89319','587C48','323461'];
var Simbolos = function(simbolo, texto) {
var TextoLeyenda = ui.Label({
    value: texto,
    style: {margin: '6px 0px 10px 15px'}});
var CajaLeyenda = ui.Label({
    style: {backgroundColor: '#' + simbolo,
padding: '15px',
margin: '0px 0px 6px 0px'}});
return ui.Panel({
    widgets: [CajaLeyenda, TextoLeyenda],
    layout: ui.Panel.Layout.Flow('horizontal')});}
for (var i = 0; i < 5; i++) {Leyenda.add(Simbolos(Simbologia[i], Etiquetas[i]));}
Map.add(Leyenda);

```

Anexo-8 Código de clasificación de imágenes RGB

```

# Import system modules
import arcpy
from arcpy.sa import *

# Set local variables
inRaster = "c:/Azul/ortofoto_pp_topindex.tif"
spectral_detail = "14.5"
spatial_detail = "10"
min_segment_size = "20"
band_indexes = "5 4 3 2"
inSegRaster = "c:/Azul/ortofoto_pp_topindex_seg.ti"

# Check out the ArcGIS Spatial Analyst extension license
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")

# Execute
seg_raster = SegmentMeanShift(inRaster, spectral_detail, spatial_detail,

```

```
min_segment_size, min_segment_size)
```

```
# Save the output
```

```
seg_raster.save("c:/Azul/ortofoto_pp_topindex_seg.tif")
```

```
# Execute
```

```
compute_att = ComputeSegmentAttributes("c:/Azul/ortofoto_pp_topindex_seg.tif", inRaster,  
                                       "COLOR;MEAN;STD;COUNT;COMPACTNESS;RECTANGULARITY")
```

```
#save output
```

```
compute_att.save("c:/test/ortofoto_pp_topindex_computeseg.tif")
```

```
# Execute
```

```
TrainIsoClusterClassifier("c:/Azul/ortofoto_pp_topindex_seg.tif", "5", "c:/Azul/azul_sig_iso.ecd",  
                          inRaster, "20",  
                          "10", "10", "COLOR;MEAN;STD;COUNT;COMPACTNESS;RECTANGULARITY")
```

```
# Execute
```

```
classifiedraster = ClassifyRaster("c:/Azul/ortofoto_pp_topindex_seg.tif", "c:/Azul/azul_sig_iso.ecd",  
                                  "c:/Azul/ortofoto_pp_topindex.tif")
```

```
#save output
```

```
classifiedraster.save("c:/Azul/Azul_classified.tif")
```

Firmas espectrales de clasificación supervisada

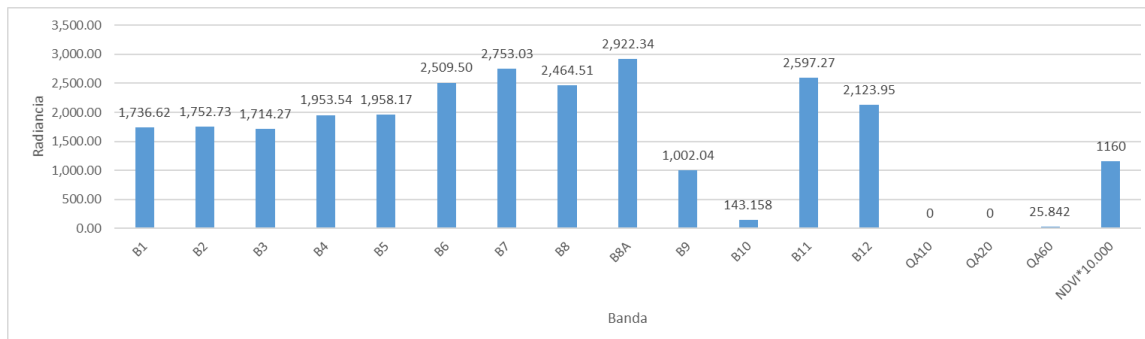


Figura 9-13 Firma espectral suelo desnudo

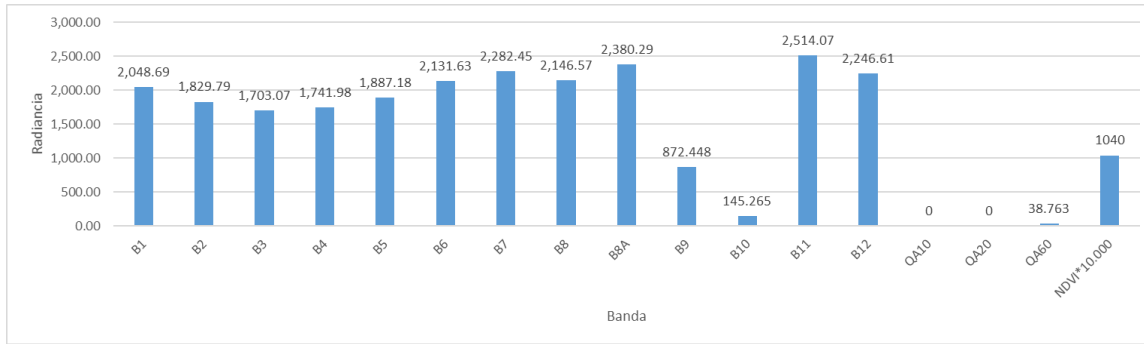


Figura 9-14 Firma espectral concreto

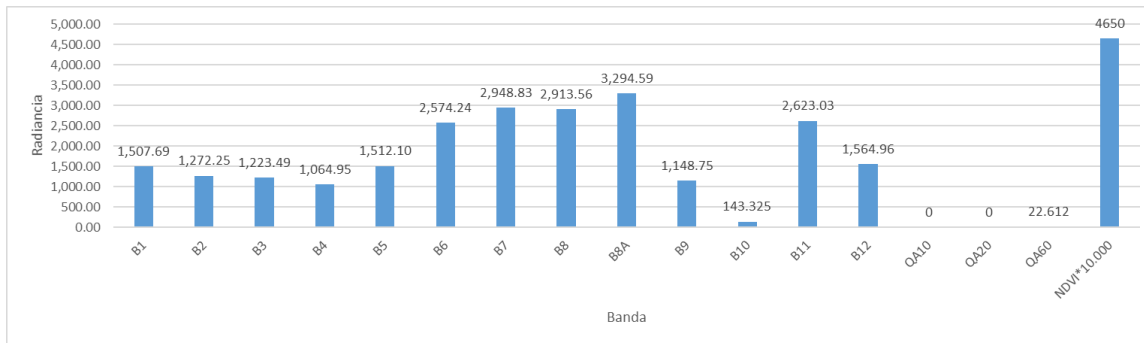


Figura 9-15 Firma espectral pastos

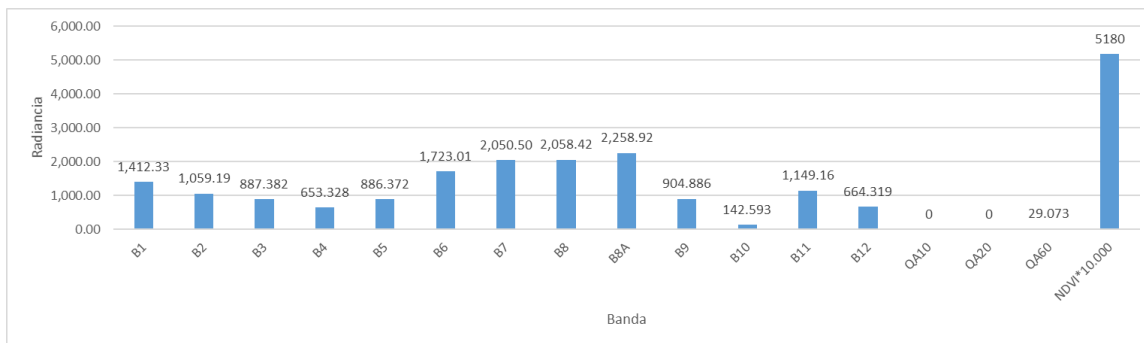


Figura 9-16 Firma espectral Bosques

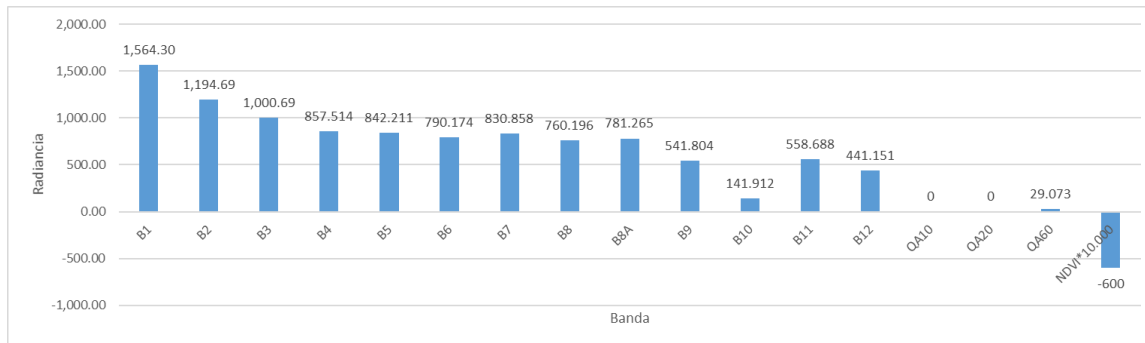


Figura 9-17 firma espectral suelo desnudo