

Evaluación de escenarios de inundación mediante herramientas hidrodinámicas y geoespaciales: el caso de estudio del río Bugalagrande, Colombia*

Nancy Estela Sánchez Pineda^a ■ Julián Garzón Barrero^b ■ Juan Carlos González Valencia^c

Resumen: Este estudio evalúa la amenaza de inundaciones en el área urbana de la cuenca del río Bugalagrande, en Colombia, al que integra modelos hidrológicos e hidráulicos con sistemas de información geográfica (SIG). Se simularon escenarios de inundación con HEC-HMS y HEC-RAS para periodos de retorno de 50 y 100 años. Las simulaciones hidrológicas aplicaron metodologías basadas en números de curva (CN) e hietogramas, mientras que el modelado hidráulico analizó la dinámica del agua en áreas críticas. Los resultados destacan vulnerabilidades significativas en zonas urbanas de baja altitud, con niveles de agua que aumentaron de 2,5 a 3 m y con extensiones de inundación que se expandieron de 27 ha a 35 ha. Las velocidades del flujo alcanzaron hasta 0,65 m/s, presentando riesgos considerables para la infraestructura local. El estudio destaca la utilidad de modelos acoplados con SIG en la gestión de inundaciones y propone un marco replicable en cuencas similares. Se recomienda la implementación de sistemas de prevención modernos integrados con modelos hidrológicos preventivos, el uso de infraestructura verde y la regulación del ordenamiento territorial en áreas vulnerables.

Palabras clave: evaluación del riesgo de inundaciones; modelación hidráulica e hidrológica; simulación numérica en hidrología; gestión de recursos hídricos; mapeo de inundaciones basado en SIG

* Artículo de investigación.

a Magíster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Docente de la Universidad del Quindío, Armenia, Colombia.

Correo electrónico: nesanchez@uniquindio.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4259-9505>

b Doctor en Ingeniería Geomática. Docente de la Universidad del Quindío, Armenia, Colombia.

Correo electrónico: juliangarzonb@uniquindio.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4871-3726>

c Ingeniero Topográfico y Geomático. Universidad del Quindío, Armenia, Colombia.

Correo electrónico: juanc.gonzalezv1@uqvirtual.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8319-900X>

Recibido: 09/01/2025 **Aceptado:** 26/05/2025 **Disponible en línea:** 22/10/2025

Cómo citar: N. E. Sánchez Pineda, J. Garzón Barrero, y J. C. González Valencia, «Evaluación de escenarios de inundación mediante herramientas hidrodinámicas y geoespaciales: el caso de estudio del río Bugalagrande, Colombia», Cien.Ing.Neogranadina, vol. 35, n.º 2, pp. 121–140, oct. 2025.

Evaluation of Flood Scenarios Using Hydrodynamic and Geospatial Tools: A Case Study of the Bugalagrande River, Colombia

Abstract: This study assesses flood hazards in the Bugalagrande River Basin through the integration of hydrological and hydraulic simulations with GIS-based analysis. Using HEC-HMS and HEC-RAS, flood scenarios were modeled for 50 and 100 years return periods. Hydrological simulations applied curve number methodologies and hyetographs, while hydraulic modeling examined water dynamics in critical areas. Results highlight significant vulnerabilities in low-altitude urban zones, with water levels increasing from 2.5 to 3 m and flood extents expanding from 27 ha to 35 ha. Flow velocities reached up to 0.65 m/s, presenting substantial risks to infrastructure. The study emphasizes the utility of coupled models and GIS in flood management and offers a framework replicable in similar basins. Recommendations include green infrastructure implementation and urban planning strategies to mitigate risks.

Keywords: Flood Risk Assessment; Hydraulic and Hydrological Modeling; Numerical Simulation in Hydrology; Water Resource Management; GIS-based Flood Mapping

Avaliação de cenários de inundação por meio de ferramentas hidrodinâmicas e geoespaciais: o caso de estudo do rio Bugalagrande, Colômbia

Resumo: Este estudo avalia a ameaça de inundações na área urbana da bacia do rio Bugalagrande, na Colômbia, integrando modelos hidrológicos e hidráulicos com sistemas de informação geográfica (SIG). Foram simulados cenários de inundação com o HEC-HMS e o HEC-RAS para períodos de retorno de 50 e 100 anos. As simulações hidrológicas aplicaram metodologias baseadas em números de curva (CN) e hietogramas, enquanto o modelamento hidráulico analisou a dinâmica da água em áreas críticas. Os resultados destacam vulnerabilidades significativas em zonas urbanas de baixa altitude, com níveis de água que aumentaram de 2,5 a 3 m e com áreas de inundação que se expandiram de 27 ha para 35 ha. As velocidades do fluxo atingiram até 0,65 m/s, apresentando riscos consideráveis para a infraestrutura local. O estudo evidencia a utilidade de modelos acoplados a SIG na gestão de inundações e propõe um marco replicável em bacias semelhantes. Recomenda-se a implementação de sistemas modernos de prevenção integrados com modelos hidrológicos preditivos, o uso de infraestrutura verde e a regulação do ordenamento territorial em áreas vulneráveis.

Palavras-chave: avaliação do risco de inundações; modelagem hidráulica e hidrológica; simulação numérica em hidrologia; gestão de recursos hídricos; mapeamento de inundações baseado em SIG

Introducción

Fenómenos naturales severos, como inundaciones, tsunamis, terremotos, incendios forestales y sequías, resultan de la interacción de complejos procesos físicos que operan dentro del sistema terrestre, manifestándose de manera violenta, dando como resultado el paisaje de la Tierra [1]. Sin embargo, cuando estos fenómenos afectan áreas pobladas, se transforman en desastres naturales, ocasionando pérdidas humanas y económicas significativas que dificultan el progreso socioeconómico de las áreas impactadas [2]. Las inundaciones, en particular, son cada vez más frecuentes y destructivas, debido a la variabilidad climática y a las actividades humanas, como lluvias más acentuadas y la expansión urbana descontrolada. Estos factores intensifican los eventos hidrometeorológicos a diferentes escalas espaciotemporales, generando escenarios de amenaza complejos y dinámicos [3], [4].

Para enfrentar estos desafíos se han lanzado iniciativas globales como la Agenda 2030 de las Naciones Unidas y el Marco de Sendai 2015-2030, que destacan la importancia de la reducción de riesgos y la protección del territorio [5], [6]. Estas directrices globales enfatizan la necesidad de comprender los mecanismos subyacentes a los desastres naturales, lo que ha atraído la atención de expertos de diversas disciplinas para desarrollar estrategias efectivas de mitigación y planificación [7].

La urbanización y el uso intensivo de recursos naturales ha transformado extensas áreas naturales en entornos impermeables, alterando la capacidad de infiltración del suelo y aumentando la escorrentía superficial [8]. Este fenómeno, combinado con lluvias intensas amplificadas por el cambio climático, que exceden la capacidad de los cauces fluviales, ha incrementado el riesgo de inundaciones, incluso en áreas anteriormente consideradas seguras [9]. Además, la pérdida de ecosistemas, como bosques y humedales, fundamentales para la regulación hídrica, agrava esta problemática, incrementando la vulnerabilidad de las comunidades [10], [11]. Estos factores representan desafíos críticos para la gestión del riesgo y destacan la necesidad de implementar herramientas avanzadas para evaluar la magnitud de la amenaza.

El municipio de Bugalagrande, Colombia, no ha sido ajeno a estos desafíos. Históricamente, el río Bugalagrande ha desbordado su cauce en varias ocasiones, provocando inundaciones en el área urbana. Entre los eventos más destacados se encuentran los ocurridos en 1965, registrados en la Biblioteca Departamental del Valle del Cauca [12], en 2021, según la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (cvc) [13], y más recientemente en 2023, reportado por Infobae [14]. Estos episodios refuerzan la necesidad de implementar soluciones efectivas para anticipar y mitigar futuras inundaciones.

La modelación hidrológica e hidráulica, en conjunto con tecnologías de sistemas de información geográfica (SIG), ofrece un enfoque integral para analizar y predecir amenazas de inundación. Los modelos hidrológicos, como Hydrologic Engineering Center-Hydrological Model System (HEC-HMS), estiman el volumen de escorrentía generado en una cuenca bajo diferentes escenarios de precipitación, mientras que otros modelos hidráulicos, como Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS), simulan la dinámica del flujo de agua en canales y áreas adyacentes [15], [16]. Estas herramientas, integradas con extensiones SIG como HEC-GeORAS, facilitan la creación de mapas de inundaciones y la evaluación cuantitativa y cualitativa de riesgos, permitiendo alertas tempranas y estrategias de mitigación efectivas [17], [18].

En este contexto, el presente estudio se enfoca en el municipio de Bugalagrande, una región con alta vulnerabilidad a inundaciones debido a su proximidad al río Bugalagrande y a la falta de planes de mitigación adecuados para manejar eventos extremos. Este estudio tiene como objetivo identificar las zonas con mayor exposición a inundaciones en un sector urbano adyacente al río, considerando caudales máximos asociados a periodos de retorno de 50 y 100 años. Para esto se delimitaron y sectorizaron las unidades hidrográficas mediante el método Pfafstetter, se calcularon los números de curva (CN por su sigla en inglés) a partir de datos texturales y de cobertura del suelo, y se realizaron simulaciones hidrológicas e hidráulicas con HEC-HMS y HEC-RAS. Finalmente, se generaron

mapas detallados de amenaza utilizando HEC-GeorAS en la plataforma ArcGIS Pro. Estos mapas permiten identificar áreas vulnerables y facilitan a los planificadores el fortalecimiento de los planes de mitigación, reduciendo las consecuencias negativas en la comunidad y su ecosistema.

Este estudio aporta al campo de la ingeniería hidráulica, al integrar modelos hidrológicos e hidráulicos con tecnologías SIG para evaluar escenarios de inundación en el río Bugalagrande. Este enfoque combina análisis hidrometeorológicos, modelación computacional y validación cartográfica, lo que facilita la caracterización de niveles de agua, velocidades de flujo y extensión de áreas inundadas. Además, el uso de herramientas como HEC-HMS y HEC-RAS aportan un marco metodológico replicable, proporcionando información para la gestión del riesgo y la planificación hidráulica en zonas urbanas vulnerables.

Materiales y métodos

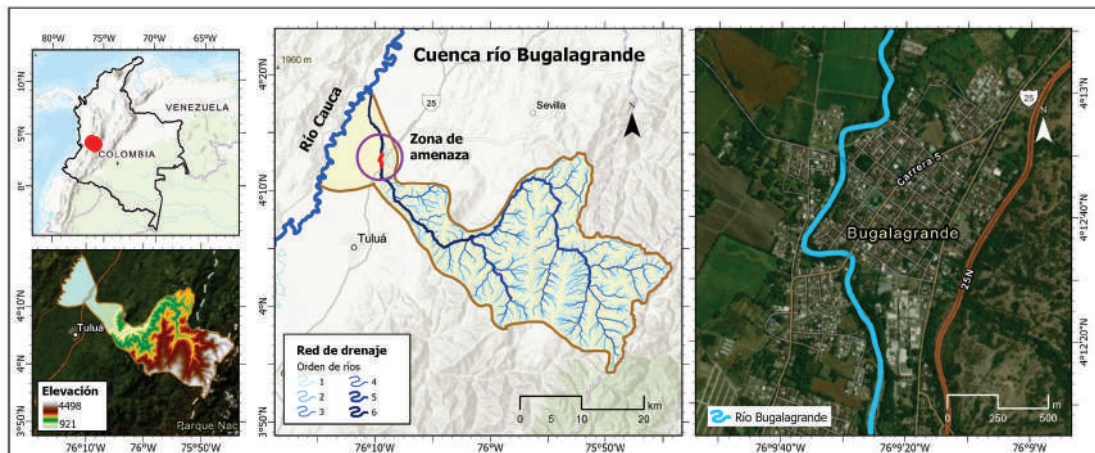
Área de estudio

El río Bugalagrande, ubicado en el Valle del Cauca, Colombia, es un afluente importante del río Cauca, uno de los principales sistemas fluviales del país. La cuenca del río Bugalagrande abarca una compleja red de arroyos y quebradas que convergen

en su cauce principal. El área de estudio abarca el tramo del río que cruza la zona urbana de Bugalagrande, delimitado aproximadamente entre las coordenadas de latitud $4^{\circ}12'20''\text{N}$ y $4^{\circ}12'55''\text{N}$ y longitud $76^{\circ}09'10''\text{W}$ y $76^{\circ}09'40''\text{W}$ (figura 1). Este sector cubre una superficie aproximada de 914 km^2 , con altitudes que varían desde los 900 m en las planicies bajas hasta los 4500 m en las montañas del flanco occidental de la Cordillera Central. Estas variaciones altitudinales generan microclimas locales que afectan significativamente los patrones de precipitación y temperatura.

El clima de la cuenca es tropical de montaña, caracterizado por precipitaciones distribuidas a lo largo del año, aunque más intensas durante la temporada lluviosa, de abril a noviembre. El mes más lluvioso es abril, con 173 mm de precipitación, mientras que enero, el mes más seco, registra 61 mm, para un total anual promedio de 1249 mm. Las temperaturas medias anuales son estables, con una variación aproximada de $1,1^{\circ}\text{C}$ y un promedio de $23,9^{\circ}\text{C}$ [19]. Durante eventos de lluvias, el suelo se satura rápidamente, generando escorrentías que alimentan quebradas y el cauce principal del río. Estos flujos son los principales detonantes de desbordamientos e inundaciones en el área, destacando la importancia de su análisis para la gestión de riesgos y los estudios hidrológicos.

Figura 1. Cuenca del río Bugalagrande



Fuente: mapa elaborado con datos base de ESRI, utilizando ArcGIS Pro. Los datos incluyen la capa base World Imagery y World Topographic Map. © ESRI, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS y otros colaboradores. <https://www.arcgis.com>.

Recolección de datos

Para modelar y simular inundaciones en la cuenca del río Bugalagrande se recopiló información detallada en la tabla 1. Esta incluye un Modelo Digital de Elevaciones (DEM por sus siglas en inglés) de 12,5 metros de resolución espacial, obtenido de ALOS PALSAR, datos históricos de precipitación del Ideam, coberturas del suelo derivadas de imágenes Sentinel-2 Land Cover Explorer de ESRI y mapas texturales del suelo de la FAO/Unesco. Con levantamientos topográficos a escala 1:1000 y datos obtenidos mediante dron y Global Navigation Satellite

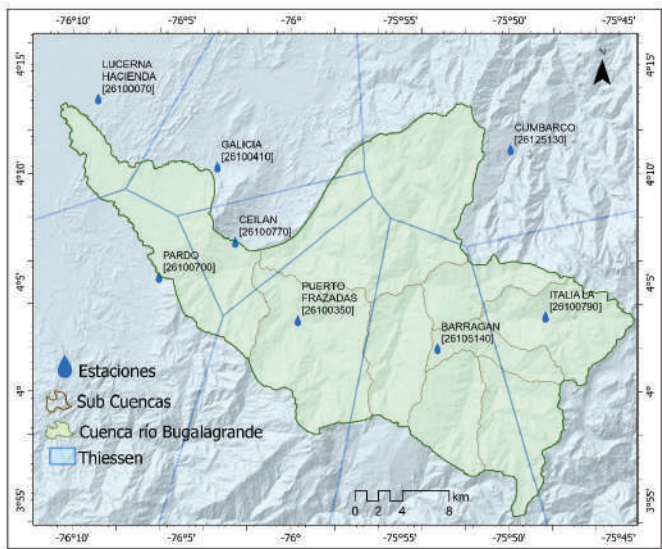
System (GNSS), se generó un modelo Triangular Irregular Network (TIN) de alta precisión, con mediciones transversales del lecho del río cada 50 metros, mientras que los registros pluviométricos del Ideam facilitaron la evaluación de patrones de lluvia y escorrentía para la modelación hidrológica. La información recopilada, proveniente de geoportales globales de acceso libre, proporciona una caracterización de las propiedades físicas e hidrológicas de la cuenca. Esto constituye la base para simulaciones hidráulicas y análisis de escenarios de inundación.

Tabla 1. Datos recopilados sobre la cuenca del río Bugalagrande

Datos	Fuente	Resolución	Propósito
DEM	ALOS PALSAR https://search.asf.alaska.edu/#/	12,5 metros	Delimitación de cuencas y definición de red hidrográfica
TIN	Levantamiento topográfico	Escala 1:1000	Simulación hidráulica
Cobertura suelo	ESRI, Sentinel-2 Land Cover explorer https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/	10 m	Generación CN
Textura	FAO/Unesco, Soil Map of the World https://soilgrids.org/	Escala 1:5 000 000	Generación CN
Lluvia	Ideam, Datos hidrometeorológicos http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/	Precipitación total diaria (mm)	Modelación hidrológica
Dron	Levantamiento fotogramétrico	Escala 1:1000	Generación TIN y rugosidad superficial

Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Estaciones hidrometereológicas, subcuencas y polígonos de Thiessen



Fuente: elaboración propia.

Metodología

En este estudio se evaluaron y modelaron escenarios de inundación mediante la integración de herramientas hidrológicas, geoespaciales y de simulación hidráulica. Se siguieron cuatro etapas principales, que incluyeron la recopilación de información topográfica detallada, el análisis hidrológico, la simulación del comportamiento del flujo y la elaboración de cartografía de inundación.

Inicialmente, se recolectaron datos topográficos de alta precisión mediante levantamientos en campo, lo que permitió generar modelos digitales de elevación y representar con detalle la superficie del área de estudio. Posteriormente, se caracterizaron las condiciones hidrológicas del sistema a partir de registros históricos de precipitación, definiendo las variables de parametrización de los modelos de simulación.

En la etapa de simulación hidráulica se identificaron variables como la profundidad y la velocidad del agua, utilizando modelos que integran las características del terreno y los coeficientes de rugosidad superficial, ajustados a las coberturas existentes. La combinación de estas herramientas con SIG permitió cuantificar la magnitud y la extensión de las zonas inundadas. Las etapas se amplían a continuación.

Etapa 1. Sectorización de la cuenca con el método Pfafstetter

La delimitación de la cuenca y la caracterización de su sistema de drenaje se llevaron a cabo a

partir del relieve topográfico derivado del DEM de ALOS PALSAR, siguiendo un procedimiento estándar de análisis hidrológico. Este incluyó el rellenado de depresiones y suavizado de picos, la estimación de la dirección y acumulación de flujo, y la definición de cauces y puntos de salida de las subcuencas. El método Pfafstetter se utilizó para sectorizar y codificar jerárquicamente la cuenca hidrográfica [20]. Este sistema asigna códigos únicos en numeración de base 10, representando relaciones hidrológicas y topográficas, como los flujos aguas arriba y aguas abajo, visualizando los cuatro afluentes secundarios al cauce principal. Las zonas de aporte de los afluentes secundarios fueron representadas mediante valores pares (2, 4, 6, 8), mientras que las subcuencas intermedias se codificaron con valores impares (1, 3, 5, 7, 9). Este enfoque jerárquico permitió agregar dígitos para identificar subcuencas, reflejando la organización natural del flujo de agua y proporcionando una estructura analítica para el estudio hidrológico [21].

Etapa 2. Hietogramas de precipitación de diseño

Durante esta etapa se recopilaron y analizaron registros pluviométricos de ocho estaciones meteorológicas suministrados por el Ideam, que se encuentran dentro de la zona de influencia de la cuenca. Las estaciones consideradas fueron las siguientes: Ceilán, Galicia, La Italia, Pardo, Barragán, Lucerna hacienda, Puerto frazadas y Cumbarco. Sus registros anuales se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Datos anuales de precipitación (mm)

Año	Ceilán 26100770	Galicia 26100410	La Italia 26100790	Pardo 26100700	Barragán 26105140	Lucena hacienda 26100070	Puerto frazadas 26100350	Cumbarco 26125130
2003	75	100	62	60	38	64	78	84
2004	79	82	76	70	39	68	52	69
2005	67	80	92	71	36	67	90	62
2006	70	70	78	98	26	61	90	68
2007	51	70	40	75	49	58	70	79
2008	89	55	44	50	48	85	54	70

Año	Ceilán 26100770	Galicia 26100410	La Italia 26100790	Pardo 26100700	Barragán 26105140	Lucena hacienda 26100070	Puerto frazadas 26100350	Cumbarco 26125130
2009	92	74	30	45	50	60	95	63
2010	80	46	38	80	38	70	64	66
2011	90	110	51	99	60	59	63	84
2012	70	51	54	115	39	72	100	77
2013	65	65	54	59	44	50	61	74
2014	80	81	30	65	40	67	58	60
2015	70	50	24	50	30	71	30	72
2016	60	75	35	50	63	52	65	91
2017	130	75	42	88	35	95	67	87
2018	132	97	81	41	31	66	67	96
2019	130	70	60	77	34	68	74	77
2020	133	85	50	120	24	67	60	90
2021	135	60	42	70	34	80	98	89
2022	90	74	36	85	44	65	74	72
2023	99	59	100	60	39	83	79	93

Fuente: elaboración propia.

Mediante la aplicación de polígonos de Thiesen se generaron áreas discretas para cada subcuenca, optimizando la correspondencia entre las subcuencas delimitadas en la etapa uno y las estaciones meteorológicas (figura 2). Este procedimiento permitió obtener valores ponderados de precipitación para cada subcuenca.

Ajuste con la distribución de Gumbel

Se optó por emplear la distribución de Gumbel para estimar la precipitación máxima correspondiente a distintos períodos de retorno. Esta distribución, ampliamente utilizada en hidrología para modelar eventos extremos, se eligió por su eficacia en la representación de fenómenos hidrometeorológicos poco frecuentes, pero de gran magnitud [22], [23], [24]. La idoneidad de esta distribución se verificó mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S), utilizada para comparar la función empírica de frecuencias con el modelo teórico. La ecuación empleada para calcular la precipitación máxima en función del período de retorno T es la siguiente:

$$P_{\max} = \bar{P} - \frac{\sigma_Q}{\sigma_N} \cdot \left[Y_N - \ln \ln T \right] \quad (1)$$

En la que $P_{\max}$ (mm): precipitación máxima estimada para el período de retorno T ; $\bar{P}$ (mm): media de los datos de precipitación observados; σ_Q (mm): desviación estándar de la serie de precipitación máxima anual observada; σ_N (adimensional): parámetro de escala de la distribución de Gumbel, y Y_N (adimensional): valor medio del factor de forma de la distribución de Gumbel.

Los valores obtenidos facilitaron la elaboración de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), expresadas en función de la precipitación máxima registrada en 24 horas para distintos periodos de retorno.

Desarrollo de las curvas IDF

En la modelación de las curvas IDF se empleó el método Dyck y Peschke [25], que permite relacionar las precipitaciones máximas en 24 horas (P_{24h} en mm) con eventos de menor duración (P_D) en mm, en la que D es la duración del evento de precipitación en minutos:

$$P_D = P_{24h} \cdot \left(\frac{D}{1440}\right)^{0,25} \quad (2)$$

La intensidad máxima (I_{max}) en mm/h para diferentes períodos de retorno y duraciones se calcula como sigue:

$$I_{max} = K \cdot T^a \cdot D^{-b} \quad (3)$$

En la que T representa el período de retorno expresado en años; D corresponde a la duración del evento de tormenta en minutos; y K , a , b son constantes adimensionales derivadas mediante transformación logarítmica y ajuste por mínimos cuadrados.

Generación de hietogramas de diseño

Para caracterizar la variabilidad temporal de la precipitación en eventos extremos, se generaron hietogramas con el método del Bloque Alterno. Este procedimiento emplea curvas IDF para estimar los valores de intensidad pluviométrica en distintos intervalos de duración, organizando los picos en el centro y distribuyendo los valores decrecientes hacia los extremos [26].

Etapas 3. Modelado hidrológico con HEC-HMS

La simulación hidrológica se llevó a cabo con HEC-HMS, con el propósito de representar los

procesos de generación y transferencia de caudales en la cuenca [27]. Este modelo integró los datos obtenidos en las etapas previas, incluyendo la delimitación de subcuencas y la creación de hietogramas de diseño, permitiendo estimar los caudales pico y analizar la dinámica hidrológica de la cuenca ante eventos extremos. El flujo metodológico se presenta en la figura 3.

Cálculo del tiempo de concentración y del desfase hidrológico

El tiempo de concentración (T_c) en horas, se calculó para cada subcuenca utilizando la ecuación cuatro:

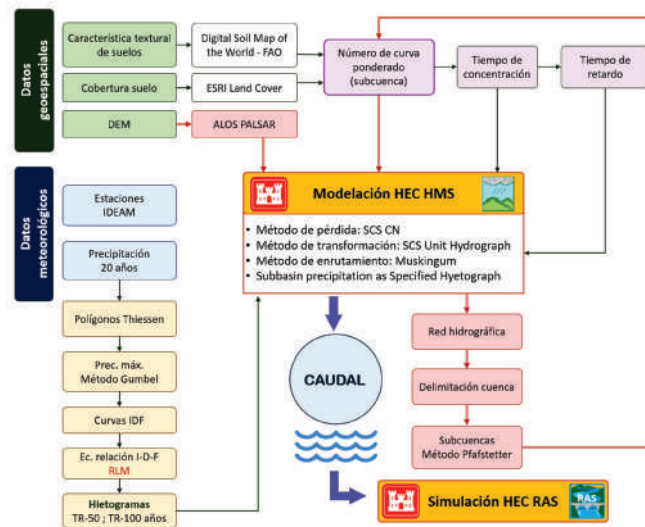
$$T_c = \frac{l^{0,8} (S+1)^{0,7}}{1140 \cdot Y^{0,5}} \quad (4)$$

En la que l representa la distancia total en metros del cauce principal, S corresponde a la capacidad máxima de retención del suelo (en milímetros) y Y indica la pendiente media de la cuenca (en porcentaje).

El tiempo de retardo (Lag) en horas, que representa el intervalo entre el centro de masas de la precipitación y el pico del escurrimiento, se estimó como sigue (ecuación 5):

$$Lag = 0,6 \cdot T_c \quad (5)$$

Figura 3. Flujo de datos para la modelación hidrológica



Fuente: elaboración propia.

Método de estimación de pérdidas y determinación del número de curva (CN)

El método empleado para estimar las pérdidas hidrológicas fue el CN desarrollado por el U.S. Soil Conservation Service (scs). Este enfoque estima las pérdidas por infiltración y retención superficial en función de las características texturales del suelo y de la cobertura vegetal.

El cálculo de CN se basó en datos de cobertura del suelo obtenidos del conjunto de datos Corine Land Cover de ESRI y de la información textural de suelos proporcionados por la FAO. Para cada subcuenca, los valores de CN fueron ponderados según la superficie, permitiendo estimar pérdidas relacionadas con eventos de precipitación. Estas pérdidas son necesarias en la modelación del escurrimiento superficial, pues están determinadas por las características texturales del suelo, la cobertura vegetal y el nivel de humedad previo al evento.

Los valores CN para cada subcuenca se calcularon como un promedio ponderado por área, usando la ecuación seis [28].

$$CN = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \cdot CN_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (6)$$

En la que A_i representa el área (km^2) y CN_i corresponde al valor asignado del número de curva y es adimensional. El CN fue utilizado para determinar la retención potencial máxima del suelo en mm (S), calculada mediante la ecuación siete.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (7)$$

Método de transformación

La transformación de la precipitación neta en un hidrograma de escurrimiento se realizó con el enfoque del Hidrograma Unitario del scs [29]. Este procedimiento, ampliamente aceptado, considera los valores de CN , S , T_c y Lag para calcular la respuesta hidrológica de la cuenca.

El CN, que oscila entre 0 y 100, representa la capacidad de retención de la cuenca, desde condiciones altamente permeables hasta completamente

impermeables. Este valor integra características específicas de la cuenca, como el uso del suelo, la vegetación y las propiedades de infiltración [30], [31].

Método de enrutamiento

El tránsito del flujo a lo largo de los cauces principales fue modelado con el método de Muskingum. Este procedimiento simula la propagación de caudales desde las zonas altas hacia los puntos de salida, considerando tanto el tiempo de viaje como las pérdidas por fricción a lo largo de los cauces. Este método requiere la calibración de dos parámetros principales: X y K [32], [33].

- X es un coeficiente adimensional, con valores de 0 y 0,5, que indica el grado de influencia del caudal sobre la capacidad de almacenamiento.
- K es un parámetro con unidades de tiempo (horas), que oscila entre una y cinco horas. Está relacionado con el retardo entre los picos de descarga y se calcula mediante la ecuación ocho:

$$K = \frac{L}{V_w} \quad (8)$$

En la que L corresponde a la longitud del tramo del cauce (m) y V_w define la rapidez de propagación de la onda de inundación (m/h), estimada como 1,5 veces la velocidad media del flujo.

Variabilidad temporal de la precipitación

La evolución temporal de la precipitación en las subcuencas se estableció a partir de hietogramas de diseño, los cuales fueron incorporados al esquemad simulación en HEC-HMS [34]. Estos hietogramas representan la distribución de los eventos de lluvia en el tiempo y fueron elaborados con datos de precipitación acumulada en intervalos definidos.

El modelo HEC-HMS fue ejecutado considerando escenarios de precipitación asociados a periodos de retorno de 50 y 100 años. Esta simulación permitió estimar los caudales pico en la cuenca y analizar su respuesta hidrológica frente a eventos de precipitación extremos.

Etapas 4. Simulación hidráulica con HEC-RAS

El software HEC-RAS es ampliamente reconocido en la modelación del flujo hidráulico de ríos y canales. Su aplicación permite analizar variables como la velocidad, la profundidad y el comportamiento del agua durante eventos de inundación [35], [36]. Este modelo, altamente versátil, admite simulaciones unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D) en condiciones de flujo permanente (*steady flow*) y no permanente (*unsteady flow*). En esta etapa se empleó HEC-RAS en combinación con HEC-GeORAS, que es una extensión para ArcGIS desarrollada en colaboración entre el Hydrologic Engineering Center (HEC) y ESRI, que facilita el análisis de datos geoespaciales y la transferencia eficiente de información entre plataformas [37]. Esta integración permitió generar mapas detallados de zonas de inundación y analizar la dinámica del flujo en la cuenca de interés.

La geometría del modelo fue generada a partir del TIN producido con datos topográficos obtenidos mediante la nube de puntos recolectada en campo. Se empleó un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,03, junto con coeficientes de expansión y contracción de 0,3 y 0,1, respectivamente, siguiendo las referencias para condiciones de transición gradual del manual de HEC-RAS [38].

Para la simulación se consideró un flujo permanente en régimen mixto (*steady flow*), estableciendo como condición de contorno una profundidad normal, con pendientes de 3 % en la sección aguas abajo y de 5 % en la de aguas arriba. Este enfoque permitió estimar la superficie libre y la velocidad del agua a lo largo del cauce.

Finalmente, los resultados obtenidos con HEC-RAS fueron exportados a ArcGIS, en el que se generaron mapas de inundación detallados que incluyeron la profundidad del agua, su extensión superficial y el volumen de flujo, permitiendo identificar áreas vulnerables para apoyar la planificación de estrategias de mitigación y gestión de riesgos.

Resultados

Etapas 1 y 2. Contexto hidrológico

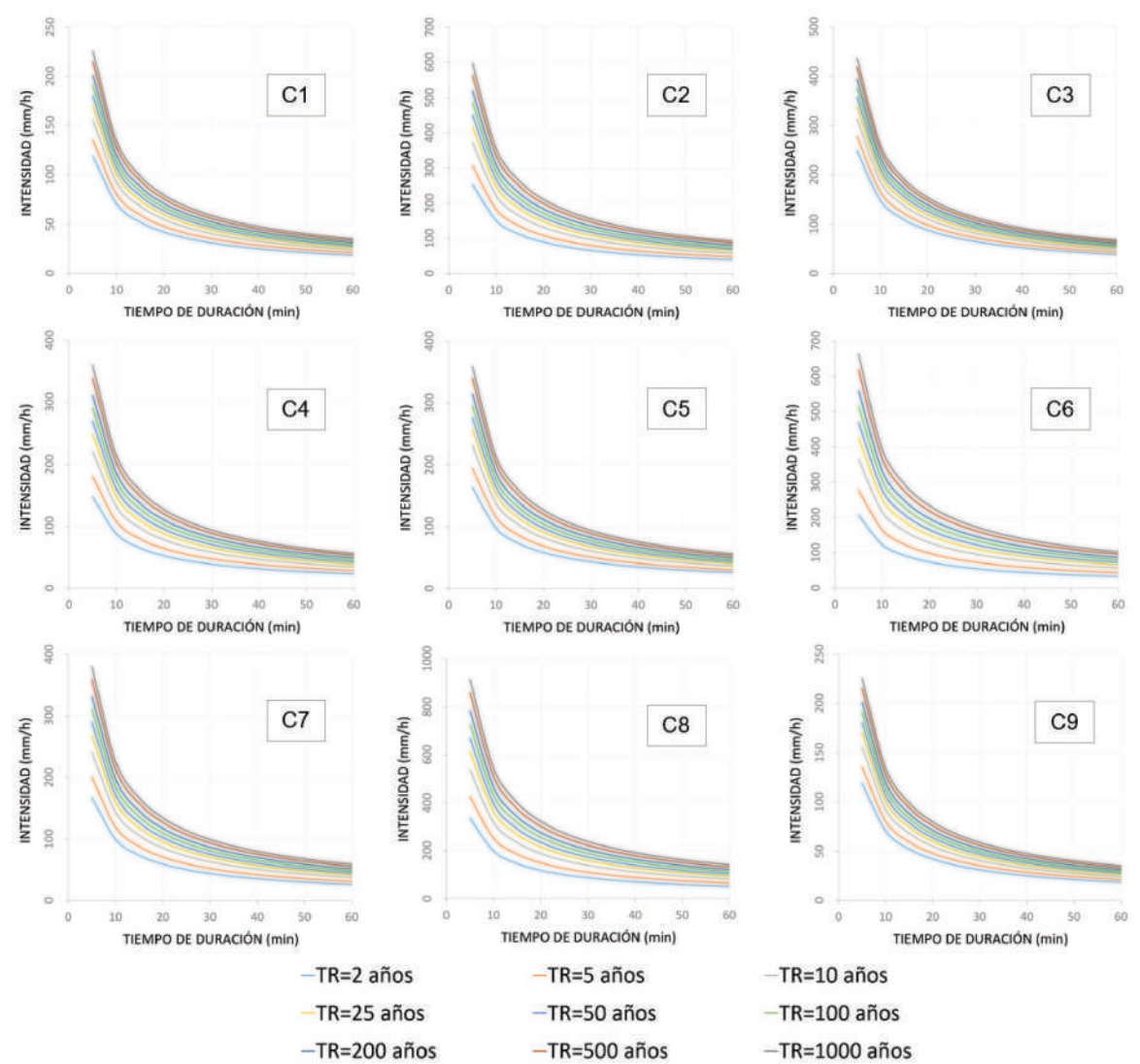
La delimitación de las subcuencas del río Buga-lagrande se realizó con la metodología Pfafstetter. Para estimar la precipitación ponderada en cada subcuenca se utilizaron Polígonos de Thiesen, que permitieron distribuir espacialmente las mediciones puntuales de las estaciones pluviométricas, asignando pesos proporcionales según su área de influencia.

Se aplicó la distribución de Gumbel para modelar eventos extremos de precipitación. La validación de este ajuste se realizó mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov (κ -s). En todas las subzonas analizadas, la diferencia máxima entre las funciones de distribución acumulada empírica y teórica ($\Delta_{teórico}$) fue menor que el valor crítico ($\Delta_{tabular} = 0,2968$) al nivel de significancia (α) de 0,05. Por ejemplo, la mayor diferencia teórica se observó en la subzona C3 ($\Delta_{teórico} = 0,1470$), muy por debajo del valor tabular. Este resultado confirma que la distribución de Gumbel proporciona un ajuste estadísticamente aceptable.

A partir de los datos históricos ajustados a la distribución de Gumbel, se generaron curvas IDF para determinar la precipitación máxima en períodos de retorno que van de 25 a 1000 años. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 4.

Para caracterizar la variabilidad temporal de la precipitación en eventos extremos, se generaron hietogramas con el método del Bloque Alternativo. Se modelaron eventos críticos correspondientes a períodos de retorno de 50 y 100 años, con el fin de evaluar las variaciones en la intensidad y duración de las lluvias extremas. Los datos generados para los hietogramas en cada subcuenca se presentan en las tablas 3 y 4.

Figura 4. Curvas IDF representadas en función de la precipitación máxima en 24 horas para diversos periodos de retorno



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Datos utilizados para la generación de hietogramas en las subcuencas C1-C5, considerando tiempos de retorno de 50 y 100 años (mm/h)

Tiempo minutos	C1		C2		C3		C4		C5
	50 años	100 años	50 años	100 años	50 años	100 años	50 años	100 años	50 años
60	0,633	0,678	1,555	1,705	1,261	1,340	0,927	1,020	0,959
120	0,676	0,725	1,663	1,822	1,348	1,433	0,991	1,090	1,025
180	0,728	0,780	1,789	1,961	1,451	1,542	1,067	1,173	1,103
240	0,789	0,846	1,940	2,127	1,573	1,672	1,157	1,272	1,197

Tiempo minutos	C1		C2		C3		C4		C5
	50 años	100 años	50 años	100 años	50 años	100 años	50 años	100 años	50 años
300	0,864	0,926	2,125	2,330	1,723	1,832	1,267	1,394	1,311
360	0,959	1,027	2,358	2,584	1,912	2,032	1,406	1,546	1,454
420	1,081	1,159	2,659	2,915	2,156	2,292	1,585	1,744	1,640
480	1,248	1,338	3,070	3,364	2,489	2,645	1,830	2,013	1,893
540	1,491	1,598	3,666	4,018	2,973	3,159	2,186	2,404	2,261
600	1,883	2,018	4,630	5,075	3,755	3,990	2,761	3,036	2,855
660	2,650	2,840	6,516	7,142	5,284	5,615	3,885	4,273	4,018
720	5,109	5,475	12,563	13,770	10,187	10,826	7,490	8,238	7,747
780	27,001	28,937	66,398	72,776	53,840	57,217	39,588	43,537	40,943
840	3,426	3,671	8,424	9,233	6,831	7,259	5,022	5,523	5,194
900	2,191	2,348	5,387	5,905	4,368	4,642	3,212	3,532	3,322
960	1,660	1,779	4,083	4,475	3,311	3,518	2,434	2,677	2,518
1020	1,357	1,454	3,337	3,658	2,706	2,876	1,990	2,188	2,058
1080	1,158	1,241	2,847	3,121	2,309	2,454	1,698	1,867	1,756
1140	1,016	1,089	2,498	2,738	2,025	2,152	1,489	1,638	1,540
1200	0,909	0,974	2,235	2,449	1,812	1,926	1,332	1,465	1,378
1260	0,825	0,884	2,028	2,223	1,644	1,748	1,209	1,330	1,251
1320	0,757	0,811	1,861	2,040	1,509	1,604	1,110	1,220	1,148
1380	0,701	0,751	1,723	1,889	1,397	1,485	1,027	1,130	1,063
1440	0,653	0,700	1,607	1,761	1,303	1,385	0,958	1,054	0,991

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Datos utilizados para la generación de hietogramas en las subcuencas C6-C9, considerando tiempos de retorno de 50 y 100 años (mm/h)

Tiempo minutos	C5	C6		C7		C8		C9	
	100 años	50 años	100 años	50 años	100 años	50 años	100 años	50 años	100 años
60	1,043	1,569	1,774	1,003	1,095	2,274	2,530	0,965	1,050
120	1,115	1,677	1,896	1,072	1,171	2,431	2,704	1,031	1,122
180	1,200	1,805	2,040	1,154	1,259	2,616	2,910	1,110	1,208
240	1,302	1,957	2,213	1,251	1,366	2,837	3,156	1,204	1,310
300	1,426	2,144	2,424	1,370	1,496	3,108	3,457	1,318	1,435
360	1,582	2,378	2,688	1,520	1,660	3,447	3,834	1,462	1,592
420	1,784	2,682	3,032	1,715	1,872	3,888	4,325	1,649	1,795
480	2,059	3,096	3,500	1,979	2,161	4,488	4,992	1,904	2,072

Tiempo minutos	C5	C6		C7		C8		C9	
	100 años	50 años	100 años	50 años	100 años	50 años	100 años	50 años	100 años
540	2,459	3,698	4,181	2,364	2,581	5,361	5,963	2,274	2,475
600	3,106	4,670	5,280	2,985	3,260	6,771	7,530	2,872	3,126
660	4,371	6,572	7,430	4,201	4,587	9,529	10,598	4,042	4,399
720	8,427	12,671	14,325	8,100	8,844	18,371	20,432	7,792	8,481
780	44,540	66,970	75,713	42,810	46,742	97,092	107,986	41,182	44,822
840	5,651	8,496	9,605	5,431	5,930	12,318	13,700	5,225	5,686
900	3,614	5,434	6,143	3,473	3,792	7,878	8,761	3,341	3,637
960	2,739	4,118	4,656	2,632	2,874	5,970	6,640	2,532	2,756
1020	2,239	3,366	3,805	2,152	2,349	4,880	5,427	2,070	2,253
1080	1,910	2,872	3,247	1,836	2,004	4,163	4,631	1,766	1,922
1140	1,676	2,519	2,848	1,610	1,758	3,653	4,062	1,549	1,686
1200	1,499	2,254	2,548	1,441	1,573	3,267	3,634	1,386	1,508
1260	1,360	2,045	2,313	1,308	1,428	2,966	3,298	1,258	1,369
1320	1,248	1,877	2,122	1,200	1,310	2,722	3,027	1,154	1,256
1380	1,156	1,738	1,965	1,111	1,213	2,520	2,803	1,069	1,163
1440	1,078	1,621	1,832	1,036	1,131	2,350	2,613	0,997	1,085

Fuente: elaboración propia.

Etapa 3. Modelización hidrológica HEC-HMS

Los valores del CN presentaron una variabilidad significativa entre las subcuencas, reflejando diferencias en la cobertura y textura del suelo. Los valores de retención potencial máxima del suelo (S), derivados de los CN y otros parámetros de la modelación hidrológica, se presentan en la tabla 5. Subcuencas como c7 y c8, con valores más altos de CN, evidenciaron menores pérdidas y una respuesta más rápida al escurrimiento directo.

Para transformar la precipitación neta en hidrogramas de escurrimiento se utilizó el método de Hidrograma Unitario. Para cada subcuenca se

determinaron los parámetros críticos, como los tiempos de concentración (T_c) y retardo (Lag). Los valores de T_c oscilaron entre 3,07 horas (C8) y 10,24 horas (C3), mientras que los tiempos de retardo oscilaron entre 1,84 horas (C8) y 6,14 horas (C3). Estas variaciones reflejaron las diferencias en la longitud del cauce, la pendiente media y las características del suelo de cada subcuenca. Para simular el desplazamiento del flujo a lo largo de los cauces principales de la cuenca se aplicó el método de Muskingum, que incorpora efectos de almacenamiento y atenuación. Los valores de los parámetros de encauzamiento, el coeficiente de almacenamiento (X) y el tiempo de almacenamiento (K) están detallados en la tabla 6.

Tabla 5. Parámetros para la modelación hidrológica

Subcuenca	Área (km ²)	CN	L(km)	Y	S	L(ft)	Y (%)	Tc (h)	Lag (h)	Lag (min)
C1	130,59	49,61	38,06	0,30	10,16	122127,23	30,29	10,12	6,07	364,31
C2	103,95	35,99	21,14	0,46	17,78	67827,30	45,92	7,39	4,44	266,16

Subcuenca	Área (km ²)	CN	L(km)	Y	S	L(ft)	Y (%)	Tc (h)	Lag (h)	Lag (min)
C3	179,33	42,61	38,56	0,43	13,47	123726,87	43,45	10,24	6,14	368,66
C4	51,948	55,21	15,57	0,42	8,11	49963,08	41,92	3,65	2,19	131,49
C5	39,175	51,03	15,52	0,48	9,60	49801,90	48,43	3,77	2,26	135,60
C6	64,432	53,71	16,56	0,56	8,62	53147,70	56,26	3,44	2,06	123,85
C7	29,345	56,65	13,66	0,41	7,65	43842,03	40,58	3,22	1,93	116,06
C8	46,422	54,98	12,58	0,43	8,19	40369,04	42,56	3,07	1,84	110,67
C9	59,520	52,81	17,51	0,51	8,94	56171,23	50,54	3,88	2,33	139,72

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Parámetros para la modelación del tránsito de flujo

Río	L(km)	p (m/m)	p (%)	K	X
R4	3,81688	0,02279	2,279	0,43	0,1
R3	7,40624	0,02214	2,214	0,71	0,1
R2	33,90622	0,02097	2,097	2,28	0,1
R1	29,92412	0,01069	1,069	2,35	0,1

Fuente: elaboración propia.

La figura 5 indica el esquema de modelo de cuenca creado por HEC-HMS, que señala las subcuencas, tramos y uniones ubicadas en la cuenca del río. Los resultados indican que el tramo R1 tiene el mayor tiempo de almacenamiento ($K = 2,35$ h), mientras que el R4 presentó el menor ($K = 0,43$ h). Esto sugiere que el tramo R1 tiene una mayor capacidad para atenuar el flujo.

El modelo se ejecutó con hietogramas diseñados para representar escenarios con tiempos de retorno de 50 y 100 años, lo que permitió evaluar eventos de precipitación extrema. Los hidrogramas resultantes reflejaron la dinámica hidrológica de la cuenca, mostrando picos de caudal específicos para cada caso. En particular, se obtuvieron caudales máximos de 518,8 m³/s en el evento de 50 años y 727,3 m³/s en el de 100 años.

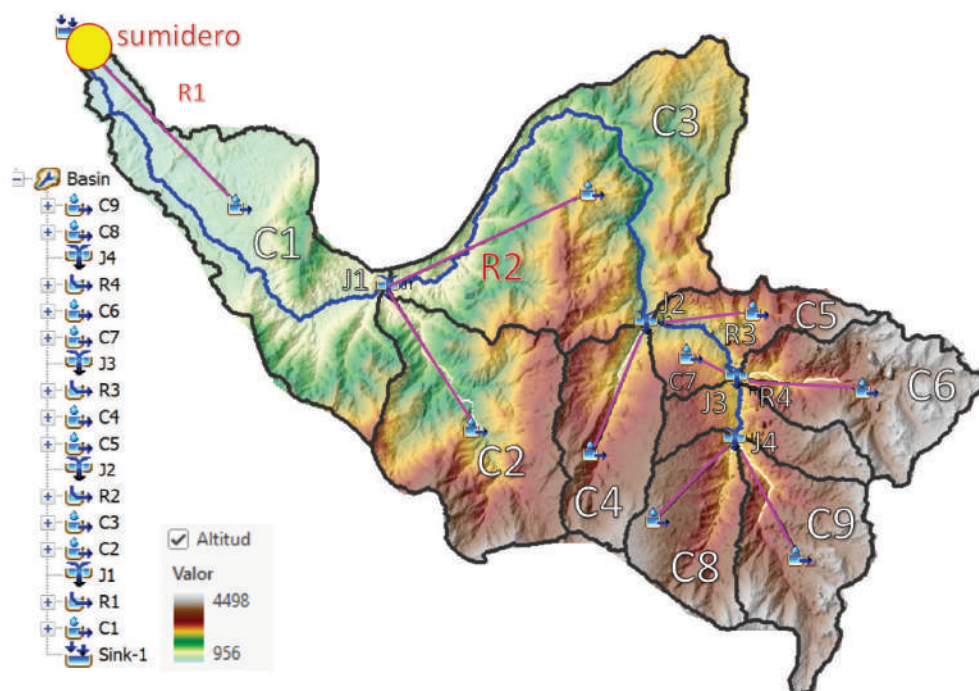
Etapa 4. Simulación hidrodinámica HEC-RAS

Para delimitar las zonas con mayor susceptibilidad a inundaciones se empleó HEC-RAS en conjunto

con herramientas SIG. Los caudales máximos fueron usados para modelar los escenarios de retorno de 50 y 100 años. Posteriormente, los resultados se integraron a ArcGIS mediante la extensión HEC-GeORAS, lo que facilitó la identificación de áreas vulnerables y la generación de mapas detallados que representan la profundidad y extensión del agua. Las salidas obtenidas se ilustraron en las figuras 6 y 7.

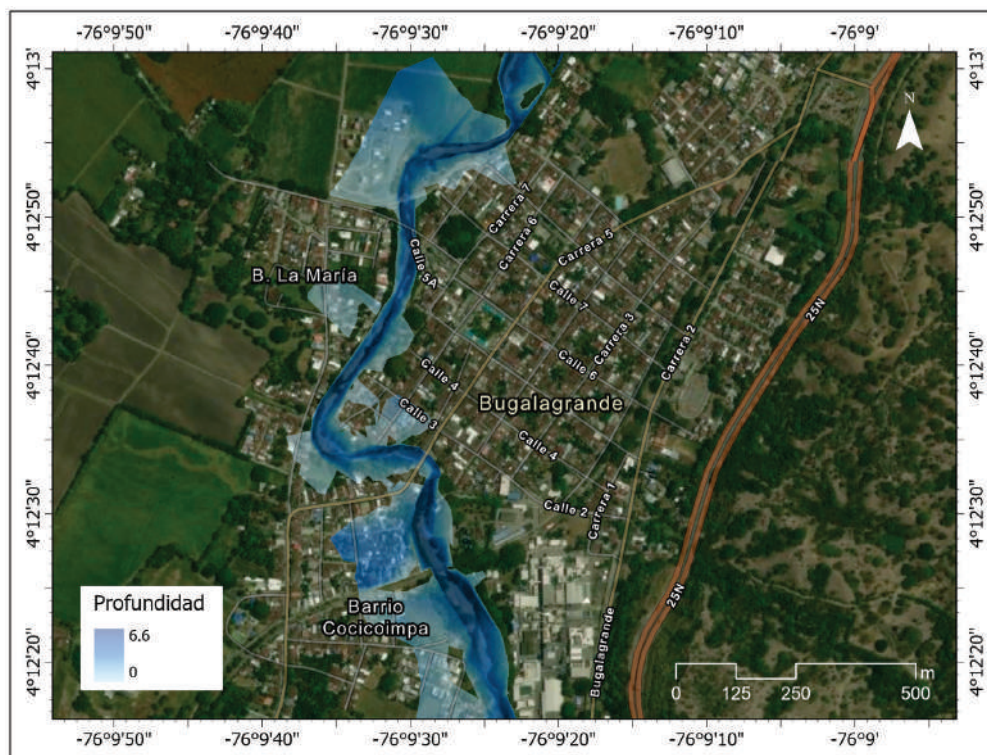
El análisis de los resultados muestra que la profundidad de las precipitaciones y la duración de los eventos de retorno en la cuenca tienen un impacto hidrológico significativo, en especial en las áreas con baja permeabilidad, como las zonas urbanas y los márgenes del río. Estas condiciones favorecen la conversión de la precipitación en escorrentía superficial, aumentando tanto los caudales como la probabilidad de inundaciones.

Figura 5. Configuración del modelo HEC-HMS para el modelado hidrológico

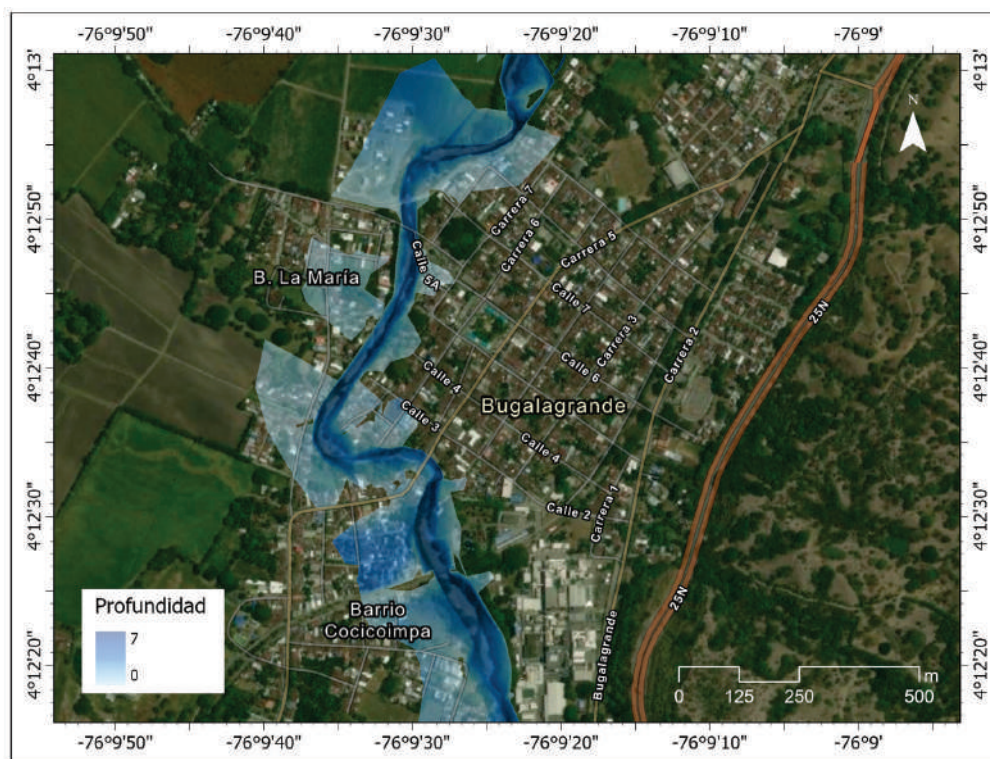


Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Amenaza por inundación, tiempo de retorno para 50 años



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Amenaza por inundación, tiempo de retorno para 100 años

Fuente: elaboración propia.

En particular, el agua que excede la capacidad de la sección transversal del río se propaga con rapidez hacia las áreas urbanas, debido a la baja permeabilidad de los márgenes y a superficies circundantes, lo que limita el drenaje natural e intensifica la acumulación de agua en zonas críticas. Las secciones del río son insuficientes en regiones donde se producen estrechamientos de la sección transversal, lo que genera inundaciones recurrentes, en particular en el margen izquierdo del cauce, a lo largo del tramo analizado.

Dicho margen muestra una mayor vulnerabilidad en escenarios de inundación, debido a su menor elevación respecto al margen derecho y al efecto centrífugo de las curvas pronunciadas del río, que desvían el flujo hacia este lado. Además, se observó un desbordamiento significativo en el margen derecho en las principales curvas del cauce, afectando directamente viviendas localizadas en estas áreas.

En términos hidrodinámicos, se encontraron niveles máximos de agua de hasta 2,5 m en áreas

de baja pendiente para escenario de 50 años y de 3 m para 100 años. Las velocidades del flujo también aumentaron, al pasar de 0,55 m/s en el escenario de 50 años de retorno a 0,65 m/s en el de 100 años, reflejando el impacto incremental de los eventos extremos.

En cuanto a la extensión de las inundaciones, el caudal correspondiente a un período de retorno de 50 años afectó un área de 27 ha, mientras que el de 100 años incrementó la superficie afectada a 35 ha. Estas inundaciones representan una amenaza considerable para las áreas urbanas, en las que las altas velocidades del flujo y los elevados niveles de agua resultan en un riesgo crítico.

Discusión

Este estudio incorporó herramientas avanzadas de modelación hidrológica e hidrodinámica para analizar el riesgo de inundaciones en la cuenca del río Bugalagrande, estableciendo un marco robusto para la planificación territorial y la gestión del

riesgo. La delimitación de subcuencas mediante la metodología Pfafstetter, combinada con el método de Thiessen para el cálculo de precipitación ponderada, demostró ser efectiva en la representación espacial de los patrones de precipitación. Sin embargo, el método de Thiessen, aunque simple y consistente en escenarios con pocas estaciones pluviométricas, carece de precisión en cuencas con alta heterogeneidad geomorfológica. Futuras investigaciones podrían explorar técnicas de interpolación avanzadas para mejorar la representación en escenarios complejos [39].

El uso de HEC-HMS permitió modelar con precisión los procesos de generación y transferencia de caudales en la cuenca. Los resultados mostraron que las subcuencas con mayores valores de CN presentan menor retención potencial y una respuesta más rápida al escurrimiento, lo que es consistente con estudios realizados en cuencas andinas [40]. La variabilidad en parámetros, como los tiempos de concentración (T_c) y de retardo (Lag), destacan la importancia de disponer de datos más detallados para mejorar la precisión del modelo. Además, el uso de hietogramas generados mediante el método del Bloque Alternó permitió modelar escenarios críticos de precipitación, ofreciendo recursos para la planificación y la gestión del riesgo.

La integración de HEC-RAS con SIG facilitó generar mapas detallados de inundación para tiempos de retorno de 50 y 100 años, identificando las zonas más bajas de la cuenca como las más vulnerables, debido a los mayores caudales pico y a la extensión de las áreas inundadas. Los resultados destacan la capacidad del tramo R1 para atenuar el flujo ($K = 2,35$ h), enfatizando la importancia de considerar la dinámica fluvial en la planificación territorial [36], [41].

La metodología permitió identificar zonas vulnerables caracterizadas por bajas altitudes, pendientes suaves y una alta concentración de asentamientos urbanos. Estas condiciones aumentan significativamente la sensibilidad de estas áreas a los eventos extremos de precipitación. La combinación de hietogramas y mapas de amenaza por inundación ofrecen elementos relevantes para formular estrategias de mitigación y la planificación de infraestructuras resilientes en cuencas urbanas vulnerables.

Diversos estudios han demostrado que la implementación de soluciones basadas en la naturaleza, como la restauración de humedales, la revegetalización de riberas y los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS), puede reducir de forma significativa el riesgo de inundaciones urbanas [17], [18], [36]. En regiones con condiciones geomorfológicas similares se han aplicado exitosamente parques inundables y zonas de amortiguamiento para retener agua excedente. En este contexto, se recomienda destinar áreas curvadas del cauce a espacios verdes, como parques o humedales, complementado con un manejo integral de la cuenca que contemple la reforestación con especies nativas, la protección de humedales y la mejora de la infiltración del suelo. Asimismo, la implementación de infraestructuras que incorporen soluciones naturales y el cumplimiento de normativas urbanísticas que restrinjan construcciones en zonas inundables pueden disminuir de forma relevante la exposición al riesgo. Estudios futuros podrían modelar estas alternativas bajo distintos escenarios de precipitación y urbanización, evaluando su impacto en la resiliencia territorial.

Este estudio se encuentra limitado por la calidad y resolución de los datos de entrada, como registros pluviométricos y topográficos, que contienen incertidumbres. La incorporación de datos de alta resolución y técnicas de validación con diferentes modelos es necesaria para mejorar la confiabilidad de los resultados.

Conclusiones

Este estudio permitió identificar áreas potencialmente expuestas a inundaciones dentro del área urbana de la cuenca del río Bugalagrande, mediante la combinación de herramientas SIG y los modelos hidrológicos e hidráulicos HEC-HMS y HEC-RAS. Los resultados indicaron que, en escenarios de retorno de 50 y 100 años, los niveles de agua aumentaron de 2,5 m a 3 m, mientras que el área inundada se expandió de 27 ha a 35 ha. Asimismo, la velocidad media del flujo alcanzó valores de hasta 0,65 m/s en zonas urbanas, representando un riesgo significativo para la infraestructura y las comunidades locales.

En particular, el análisis reveló que la cuenca baja del río está en ocasiones expuesta a incrementos en los niveles de agua, debido a lluvias intensas y a tasas elevadas de descarga, lo que resulta en la propagación del flujo hacia tierras adyacentes de baja topografía y poca pendiente. Estas condiciones contribuyen a una alta vulnerabilidad en el margen izquierdo del río, intensificada por su menor elevación y por el efecto centrífugo asociado con las curvas pronunciadas del cauce.

Este trabajo constituye un aporte inicial al modelado de procesos hidrológicos e hidráulicos en la cuenca del río Bugalagrande. Los mapas de

inundación generados son un insumo para la planificación y la gestión del riesgo en áreas urbanas vulnerables. Con base en los hallazgos, se propone el desarrollo de estrategias de mitigación que integren sistemas de alerta temprana, ordenamiento territorial basado en escenarios de amenaza, e infraestructura verde, como humedales urbanos, corredores ribereños restaurados y parques inundables.

Finalmente, se recomienda que estudios futuros simulen estas alternativas bajo distintos escenarios de cambio climático y expansión urbana, con el fin de evaluar su efectividad y fortalecer la resiliencia de los sistemas socioambientales.

Referencias

- [1] M. T. Chaudhary and A. Piracha, "Natural Disasters—Origins, Impacts, Management," *Encyclopedia*, vol. 1, no. 4, pp. 1101-1131, 2021, doi: 10.3390/encyclopedia1040084.
- [2] P. Cui *et al.*, "Scientific challenges of research on natural hazards and disaster risk," *Geogr. Sustain.*, vol. 2, no. 3, pp. 216-223, 2021, doi: 10.1016/j.geosus.2021.09.001.
- [3] H. Herawati, J. R. González-Olabarria, A. Wijaya, C. Martius, H. Purnomo, and R. Andriani, "Tools for assessing the impacts of climate variability and change on wildfire regimes in forests," *Forests*, vol. 6, no. 5, pp. 1476-1499, 2015, doi: 10.3390/f6051476.
- [4] N. Celis, A. Casallas, E. A. López-Barrera, M. Felician, M. De Marchi, and S. E. Pappalardo, "Climate Change, Forest Fires, and Territorial Dynamics in the Amazon Rainforest: An Integrated Analysis for Mitigation Strategies," *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 12, no. 10, p. 436, 2023, doi: 10.3390/ijgi12100436.
- [5] B. Li *et al.*, "An Earth Observation Framework in Service of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030," *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 12, no. 6, p. 232, 2023, doi: 10.3390/ijgi12060232.
- [6] A. Mortimer, I. Ahmed, T. Johnson, L. Tang, and M. Alston, "Localizing Sustainable Development Goal 13 on Climate Action to Build Local Resilience to Floods in the Hunter Valley: A Literature Review," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, p. 5565, 2023, doi: 10.3390/su15065565.
- [7] R. C. Bonfanti, B. Oberti, E. Ravazzoli, A. Rinaldi, S. Ruggieri, and A. Schimmenti, "The Role of Trust in Disaster Risk Reduction: A Critical Review," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 21, no. 1, 2024, doi: 10.3390/ijerph21010029.
- [8] D. Dutta, A. Rahman, S. K. Paul, and A. Kundu, "Impervious surface growth and its inter-relationship with vegetation cover and land surface temperature in peri-urban areas of Delhi," *Urban Clim.*, vol. 37, p. 100799, 2021, doi: 10.1016/j.uclim.2021.100799.
- [9] F. Karimi, and S. Sultana, "Urban Expansion Prediction and Land Use/Land Cover Change Modeling for Sustainable Urban Development," *Sustainability*, vol. 16, no. 6, p. 2285, 2024, doi: 10.3390/su16062285.
- [10] E. G. Shu *et al.*, "Integrating climate change induced flood risk into future population projections," *Nat. Commun.*, vol. 14, no. 7880, pp. 1-9, 2023, doi: 10.1038/s41467-023-43493-8.
- [11] Y. Hamed *et al.*, "Modelling of potential groundwater artificial recharge in the transboundary Algero-Tunisian Basin (Tebessa-Gafsa): The application of stable isotopes and hydroinformatics tools," *Irrig. Drain.*, vol. 71, no. 1, pp. 137-156, 2022, doi: 10.1002/ird.2647.
- [12] Biblioteca digital de la Universidad ICESI, "Inundaciones, por el desbordamiento del río Bugalagrande," 1965. Accessed: Dec. 04, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://audiovisuales.icesi.edu.co/audiovisuales/handle/123456789/31685>
- [13] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), "Emergencias en Tuluá, Bugalagrande y Andalucía por creciente súbita del río Bugalagrande." Acceso: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://cvc.gov.co/2021063>

- [14] Infobae, “Desbordamiento del río Bugalagrande provocó inundaciones en el casco urbano del municipio.” Acceso: Dec. 04, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.infobae.com/colombia/2023/04/06/desbordamiento-del-rio-en-bugalagrande-provoco-inundaciones-en-el-casco-urbano/>
- [15] L. S. Bruno, T. S. Mattos, P. T. S. Oliveira, A. Almagro, and D. B. B. Rodrigues, “Hydrological and Hydraulic Modeling Applied to Flash Flood Events in a Small Urban Stream,” *Hydrology*, vol. 9, no. 12, p. 223, 2022, doi: 10.3390/hydrology9120223.
- [16] V. Kumar, K. V. Sharma, T. Caloiero, D. J. Mehta, and K. Singh, “Comprehensive Overview of Flood Modeling Approaches: A Review of Recent Advances,” *Hydrology*, vol. 10, no. 7, p. 141, 2023, doi: 10.3390/hydrology10070141.
- [17] M. R. Mustamin, F. Maricar, R. T. Lopa, and R. Karamma, “Integration of UH SUH, HEC-RAS, and GIS in Flood Mitigation with Flood Forecasting and Early Warning System for Gilireng Watershed, Indonesia,” *Earth*, vol. 5, no. 3, pp. 274-293, 2024, doi: 10.3390/earth5030015.
- [18] N. Byaruhanga, D. Kibirige, S. Gokool, and G. Mkhonta, “Evolution of Flood Prediction and Forecasting Models for Flood Early Warning Systems: A Scoping Review,” *Water (Switzerland)*, vol. 16, no. 13, pp. 1-29, 2024, doi: 10.3390/w16131763.
- [19] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (cvc), “Caracterización de la calidad ambiental urbana municipio de Bugalagrande Valle del Cauca,” 2019.
- [20] K. L. Verdin and J. P. Verdin, “A topological system for delineation and codification of the Earth’s river basins,” *J. Hydrol.*, vol. 218, no. 1-2, pp. 1-12, 1999, doi: 10.1016/S0022-1694(99)00011-6.
- [21] M. S. Cho and J. Qi, “Determination of Spatial Pattern of Environmental Consequences of Dams in Watersheds,” *Land*, vol. 12, no. 12, p. 2154, 2023, doi: 10.3390/land12122154.
- [22] O. M. Vilorio-Marimón, Á. González-Álvarez, and J. A. Mouthón-Bello, “Analysis of the behavior of daily maximum rainfall within the department of Atlántico, Colombia,” *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 12, p. 2453, 2019, doi: 10.3390/w11122453.
- [23] Ó. E. Coronado-Hernández, E. Merlano-Sabalza, Z. Díaz-Vergara, and J. R. Coronado-Hernández, “Selection of hydrological probability distributions for extreme rainfall events in the regions of Colombia,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 5, p. 1397, 2020, doi: 10.3390/W12051397.
- [24] J. Hernández-Bedolla, L. García-Romero, C. D. Franco-Navarro, S. T. Sánchez-Quispe, and C. Domínguez-Sánchez, “Extreme Runoff Estimation for Ungauged Watersheds Using a New Multisite Multivariate Stochastic Model MASVC,” *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 16, p. 2994, 2023, doi: 10.3390/w15162994.
- [25] A. Huarca Pulcha, A. J. Espinoza Vigil, and J. Booker, “Prioritizing Riverine Bridge Interventions: A Hydrological and Multidimensional Approach,” *Designs*, vol. 7, no. 5, p. 117, 2023, doi: 10.3390/designs7050117.
- [26] B. Oh, J. C. Kim, and S. Hwang, “Influence of Rainfall Patterns on Rainfall-Runoff Processes: Indices for the Quantification of Temporal Distribution of Rainfall,” *Water (Switzerland)*, vol. 16, no. 20, p. 2904, 2024, doi: 10.3390/w16202904.
- [27] E. Janicka, J. Kanclerz, T. Agaj, and K. Gizińska, “Comparison of Two Hydrological Models, the HEC-HMS and Nash Models, for Runoff Estimation in Michałówka River,” *Sustain.*, vol. 15, no. 10, p. 7959, 2023, doi: 10.3390/su15107959.
- [28] Neha Manoj, C. Kurian, and K. P. Sudheer, “Development of a flood forecasting model using HEC-HMS,” in *Proceedings of the National Conference on Water Resources & Flood Management, National Conference on Water Resources & Flood Management with special reference to Flood Modelling, Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology, Surat, India, 2016*. [En línea]. Disponible en: <http://www.efka.utm.my/thesis/images/3psm/2007/jhh/parts1/leejin-mingaa020427d06ttht.pdf>
- [29] us Army Corps of Engineers, “Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual,” 2000.
- [30] E. Savvidou, A. Efstratiadis, A. D. Koussis, A. Koukouvinos, and D. Skarlatos, “The curve number concept as a driver for delineating Hydrological Response Units,” *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 2, p. 194, 2018, doi: 10.3390/w10020194.
- [31] M. Kang and C. Yoo, “Application of the scs-cn method to the hancheon basin on the volcanic jeju island, korea,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 12, 2020, doi: 10.3390/w12123350.

- [32] A. N. A. Hamdan, S. Almuktar, and M. Scholz, "Rainfall-runoff modeling using the hec-hms model for the al-ad-haim river catchment, northern iraq," *Hydrology*, vol. 8, no. 2, p. 58, 2021, doi: 10.3390/hydrology8020058.
- [33] X. Yu and J. Zhang, "The Application and Applicability of HEC-HMS Model in Flood Simulation under the Condition of River Basin Urbanization," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 12, p. 2249, 2023, doi: 10.3390/w15122249.
- [34] C. A. Rodríguez González, Á. M. Rodríguez-Pérez, R. López, J. A. Hernández-Torres, and J. J. Caparrós-Mancera, "Sensitivity Analysis in Mean Annual Sediment Yield Modeling with Respect to Rainfall Probability Distribution Functions," *Land*, vol. 12, no. 1, p. 35, 2023, doi: 10.3390/land12010035.
- [35] G. Siakara, N. Gourgouletis, and E. Baltas, "Assessing the Efficiency of Fully Two-Dimensional Hydraulic HEC-RAS Models in Rivers of Cyprus," *Geographies*, vol. 4, no. 3, pp. 513-536, 2024, doi: 10.3390/geographies4030028.
- [36] A. Khouz *et al.*, "Flood Susceptibility Assessment through Statistical Models and HEC-RAS Analysis for Sustainable Management in Essaouira Province, Morocco," *Geosci.*, vol. 13, no. 12, p. 382, 2023, doi: 10.3390/geosciences13120382.
- [37] S. Trif, Ștefan Bilașco, D. Petrea, S. Roșca, I. Fodorean, and I. Vescan, "Spatial Modeling through GIS Analysis of Flood Risk and Related Financial Vulnerability: Case Study: Turcu River, Romania," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 17, p. 9869, 2023, doi: 10.3390/app13179869.
- [38] us Army Corps of Engineers & Hydrologic Engineering Center, "HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual," 2016. [En línea]. Disponible en: www.hec.usace.army.mil
- [39] A. M. Helmi, M. Elgamal, M. I. Farouk, M. S. Abdelhamed, and B. T. Essawy, "Evaluation of Geospatial Interpolation Techniques for Enhancing Spatiotemporal Rainfall Distribution and Filling Data Gaps in Asir Region, Saudi Arabia," *Sustain.*, vol. 15, no. 18, p. 14028, 2023, doi: 10.3390/su151814028.
- [40] D. Mejía-Veintimilla, P. Ochoa-Cueva, and J. Arteaga-Marín, "Evaluation of the Hydrological Response to Land Use Change Scenarios in Urban and Non-Urban Mountain Basins in Ecuador," *Land*, vol. 13, no. 11, p. 1907, 2024, doi: 10.3390/land13111907.
- [41] İ. B. Peker, S. Gülbaz, V. Demir, O. Orhan, and N. Beden, "Integration of HEC-RAS and HEC-HMS with GIS in Flood Modeling and Flood Hazard Mapping," *Sustain.*, vol. 16, no. 3, p. 1226, 2024, doi: 10.3390/su16031226.