



One-dimensional hydraulic model to determine flood zones in mountain rivers

Modelo hidráulico unidimensional para determinar zonas de inundación en ríos de montaña

Diego Iván Sánchez-Tapiero*, Carlos Alexis Bonilla-Granados², Jarol Derley Ramón-Valencia³

¹Magister en Ingeniería Ambiental, diego.sanchez@unipamplona.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7270-1813>, Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

²Magister en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos, carlos.bonilla@unipamplona.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4558-4615>, Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Cúcuta, Colombia.

³PhD. en Ingeniería Ambiental, jarol.ramon@unipamplona.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2030-4904>, Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

How to cite: D. I. Sánchez-Tapiero, C. A. Bonilla-Granados, y J. D. Ramón-Valencia, “Modelo hidráulico unidimensional para determinar zonas de inundación en ríos de montaña”, *Respuestas*, vol. 29, n.º 1, pp. 22–38, Ene. 2024. <https://doi.org/10.22463/0122820X.4349>

Received on October 03, 2023 - Approved on December 17, 2023

ABSTRACT

Keywords:

Mountain rivers,
Floods,
Hydraulic model,
HEC-RAS.

Floods are recurrent phenomena produced by heavy precipitation events due to different causes: natural and anthropic, they can become potentially destructive, which is why the competent entities in relation to disaster risk management should facilitate the planning of water resources through the implementation of studies such as hydraulic modeling. The purpose of this article is to present the methodology used to determine the flood zones of a mountain river using a one-dimensional hydraulic model, taking as a case study the Pamplonita river in the La Don Juana section, of Colombia. For the study, primary information related to water function, territorial and hydrological structure contained in the Pamplonita River Hydrographic Basin Management Plan (POMCH) was collected from different national databases. The dynamic flow simulation was carried out using the one-dimensional mathematical model HEC-RAS, incorporating the necessary data to the model and once calibrated, the flood stain was determined for return periods of 2.33 and 100 years, knowing the depths and maximum flow velocities in the case study. The hydraulic model allowed to know the flow behavior of a mountain river, showing the floodable areas of 0.75 and 1.20 hectares (Ha) respectively for each return period. Finally, the results of the research can be used by competent planning agencies to reduce flood risks and seek alternatives for prevention and mitigation of future climate impacts.

RESUMEN

Keywords:

Ríos de montaña,
Inundaciones,
Modelo hidráulico,
HEC-RAS.

Las inundaciones son fenómenos recurrentes que se producen por eventos fuertes de precipitación debido a diferentes causas: naturales y antrópicas, pueden llegar a ser potencialmente destructivas, motivo por el cual las entidades competentes en relación a la gestión del Riesgo de desastres deben facilitar la planificación del recurso hídrico mediante la implementación de estudios como la modelación hidráulica. El presente artículo tiene como objetivo dar a conocer la metodología empleada para determinar las zonas de inundación de un río de montaña mediante un modelo hidráulico unidimensional, tomando como caso de estudio el río Pamplonita en el tramo La Don Juana, Colombia. Para el estudio se recopiló información primaria relacionada con la función hídrica, estructura territorial e hidrológica contenida en el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Pamplonita (POMCH); a partir de diferentes bases de datos nacionales. La simulación dinámica del flujo se realizó mediante el modelo matemático unidimensional HEC-RAS, incorporándose los datos necesarios al modelo y una vez calibrado se determinó la mancha de inundación para los periodos de retorno de 2 y 100 años, conociendo las profundidades y velocidades máximas del flujo en el caso de estudio. El modelo hidráulico permitió conocer el comportamiento del flujo de un río de montaña, evidenciando las áreas inundables de 0.75 y 1.20 hectáreas (Ha) respectivamente para cada periodo de retorno. Finalmente, los resultados de la investigación pueden ser utilizados por organismos competentes de la planificación para disminuir los riesgos por inundación y buscar alternativas de prevención y mitigación ante impactos futuros del clima.

*Corresponding author.

E-mail Address: diego.sanchez@unipamplona.edu.co (Diego Iván Sánchez-Tapiero)

Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0



Introducción

Los eventos de inundación son unos de los desastres naturales más destructivos del mundo, que además de poner en riesgo la seguridad de las personas, también generan algunas consecuencias sociales y ambientales [1]. El cambio climático aumenta la frecuencia y el peligro de inundaciones, a través de su impacto en la intensificación y la aceleración del ciclo hidrológico [2], según [3] el cambio del uso de la tierra y el cambio climático son impulsores de perturbaciones hidrológicas. Estos eventos generados por las precipitaciones intensas han causado diferentes peligros, como ráfagas de nubes, inundaciones repentinas, flujo de escombros y movimientos en masa [4], [5], convirtiendo las inundaciones en el problema global más grave en todo el mundo [6]. Por ejemplo, en China, en el sudeste asiático, más de 100 ciudades sufrieron eventos de inundación causados por este fenómeno, afectando a más de 100 millones de habitantes [7].

Los ríos de montaña a nivel mundial desempeñan un papel importante en el control de inundaciones, la conservación de la ecología y la biodiversidad de las especies [8]. Sin embargo, estos cauces son vulnerables a problemas asociados con eventos de precipitaciones intensas en periodos cortos de duración [9], ya que la velocidad del agua en zonas montañosas puede variar dentro del sistema y está sujeta a turbulencias caóticas [10], provocando que el río se desborde y cubra temporalmente las regiones vecinas [11]. Por tal razón, la determinación de zonas inundación se ha convertido en una técnica clave debido a la información que proporciona, como la profundidad del agua y el área de inundación, las cuales son esenciales para una gestión eficiente del peligro por este fenómeno [12].

La gestión eficaz de inundaciones requiere también las estimaciones probabilísticas de daños y riesgos potenciales en las zonas de inundación, además del diseño de un plan maestro para la mitigación [13]. Por ende, varios estudios determinan la magnitud de las inundaciones y su ocurrencia implementando diferentes criterios y enfoques [14]. En la literatura se pueden encontrar estudios que aplican metodologías empíricas mediante mediciones in situ, el uso de sistemas de información geográfica (SIG), sensores remotos y diferentes enfoques estadísticos para evaluar la altura del agua en las inundaciones utilizando modelos digitales de elevación (DEM) que están integrados a una herramienta computacional basada en SIG que permite generar mapas de inundación [15]. Estudios recientes han aplicado modelos hidrodinámicos para mapear las inundaciones y estimar las profundidades de flujo [16], permitiendo analizar las perturbaciones que generan al medio físico, ante diferentes escenarios de entrada [17], convirtiéndose en una herramienta importante para los tomadores de decisiones en la gestión eficaz de las inundaciones.

Sin embargo, la modelación numérica del flujo en los ríos de montaña se ve obstaculizada por la presencia de altos gradientes de velocidad, valores altos de rugosidad, alta turbulencia y gran variación en las características de los sedimentos [18]. La presencia de una no uniformidad del lecho debido a la topografía, permite que se genere una alta resistencia al flujo y grandes pérdidas de energía [19]. Por lo tanto, el modelado hidrodinámico de un río requiere el uso de herramientas computacionales que implementen métodos numéricos para resolver las ecuaciones de conservación en condiciones complejas para flujos a superficie libre, dado que estos modelos son una representación simplificada de la realidad [20]. Hoy en día, existen varias herramientas para la modelación numérica que permiten modelar cauces naturales y llanuras aluviales de forma unidimensional (1D), bidimensional (2D) o tridimensional (3D) [21], y a pesar de las diferencias en la precisión y la capacidad de los modelos, el modelo 1D se ha utilizado con mayor frecuencia para conocer los efectos de propagación de las inundaciones en los ríos, permitiendo determinar las velocidades y las profundidades de flujo [22].

Por lo anterior, el propósito de este artículo de investigación es presentar la metodología empleada para crear un modelo hidráulico unidimensional y determinar zonas de inundación en ríos de montaña, tomando como caso de estudio el río Pamplonita en el tramo La Don Juana, implementando el uso del modelo HEC-RAS para realizar una modelación unidimensional del flujo y conocer la dinámica del cauce cuando se presentan inundaciones, además de obtener las zonas propensas a inundarse con sus velocidades y profundidades para distintos periodos de retorno, cuya finalidad es contribuir en el desarrollo y adaptación de herramientas de apoyo para el mejoramiento de la gestión y la planificación, permitiendo que la población aledaña sea más resiliente ante impactos futuros.

Materiales y Métodos

Descripción del caso de estudio

El caso de estudio se desarrolla en el río Pamplonita, cuyo nacimiento es el municipio de Pamplona en el departamento de Norte de Santander con una elevación de 2333 metros sobre el nivel del mar (msnm), se extiende al suroccidente de este departamento hasta llegar a su desembocadura en el río Zulia (42 msnm) en Puerto Santander, su cuenca tiene un área de 140.603 Hectáreas (Ha) y una longitud aproximada de 300.64 kilómetros (km). Abarca a los municipios de Villa del Rosario, Los Patios, Chinácota, Pamplonita, Herrán y Ragonvalia, los cuales están incluidos totalmente en la cuenca, y los municipios de Cúcuta, Bochalema, Puerto Santander y Pamplona parcialmente [23]. El río Pamplonita tiene sus áreas de mayor pendiente en la parte sur del departamento, en el municipio de Pamplona y el parque Nacional El Tamá. Los valles se presentan en las ciudades de Cúcuta, Los Patios y Villa del Rosario. Hidrológicamente la cuenca del río está dividida en 25 subcuencas cuyas extensiones varían desde 13.1 km² hasta 202.1 km² con pendientes medias entre 48 y 26.5 grados [24].

En la mayoría de la cuenca del río Pamplonita predomina la cobertura vegetal con un porcentaje aproximado del 94% del territorio con los siguientes usos: bosque natural, bosque plantado, matorrales, herbáceas, silvopastoril, silvoagropecuaria, cultivos agrícolas, tierras agropecuarias mixtas y potreros abiertos, y solo un 6% del territorio de la cuenca se presentan coberturas de eriales, coberturas hídricas y de infraestructura [25]. La cuenca alta es una zona de recarga hídrica, ya que presenta coberturas vegetales que regulan la dinámica del agua de escorrentía, presentando numerosas microcuencas que, aunque con un volumen limitado estructuran una cadena de nacimientos de agua en esta zona y que han sido priorizados por su importancia estratégica [26].

Esta investigación se centra en la cuenca de montaña del río Pamplonita ubicada en el corregimiento de La Don Juana (Figura 1), con un tramo fluvial de 650 metros (m), que de acuerdo con los consejos Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), existen sucesos históricos de inundación en esta zona donde la comunidad se ha visto afectada en diferentes ocasiones por dichos procesos que han producido conmoción y pérdidas económicas. En el tramo se encuentra ubicada una estación limnimétrica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la cual registra el comportamiento del cauce desde 1970. En esta zona el río presenta valores mínimos de caudales medios mensuales interanuales en un rango de 1.3 hasta los 3 metros cúbicos sobre segundo (m³/s) y los valores máximos van desde los 10.1 hasta 28.5 m³/s [25].

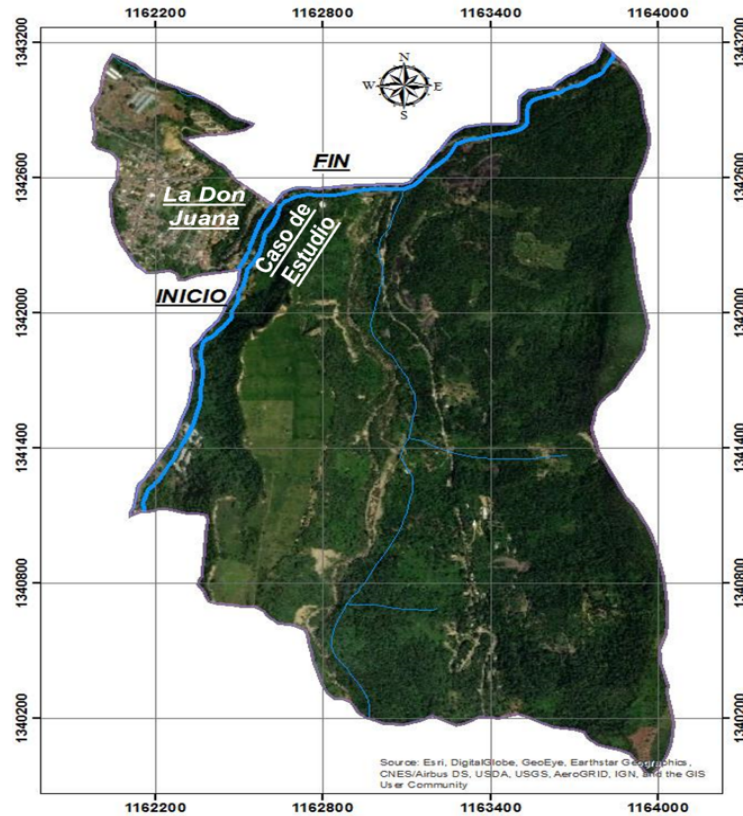


Figura 1. Ubicación del Caso de estudio

Recopilación y tratamiento de datos

Los valores de caudales y niveles máximos fueron solicitados al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales para un periodo comprendido entre 1990 y 2018, ya que presenta una buena consistencia de los datos, aunque se observan la presencia de datos faltantes en la base suministrada. Como se dispone de un adecuado registro histórico de caudales es posible ajustar una función de densidad de probabilidad que permita estimar eventos asociados con un alto periodo de retorno [27], implementándose la metodología de proporciones normales descrita en [28] para el cálculo de los valores faltantes de caudales y niveles máximos. Una vez obtenidos estos datos se efectúa el análisis estadístico, donde se realiza un ajuste con la función de probabilidad de Gumbel. Según se muestra en las Ecuaciones (1), (2) y (3), calculando los caudales máximos, con el fin de establecer el comportamiento de los eventos extremos (inundaciones) a ingresar en el modelo para diferentes periodos de retorno.

$$F(x) = e^{-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{Sx}{\sigma y} \quad (2)$$

$$u = x - \mu_y * \alpha \quad (3)$$

Donde $F(x)$ es la probabilidad de que se presente un valor igual o menor que x ; e es la base de los logaritmos neperianos; \bar{x} la media aritmética de la muestra; S_x es la desviación estándar de la muestra; α y u parámetros de Gumbel; σ_y y μ_y son las constantes de probabilidad de Gumbel, según el dato de la muestra.

Datos de Campo

Se realizaron tres campañas de campo entre los meses de mayo y noviembre del 2018, para recolectar la información requerida del caso de estudio. Se recopilaban tres tipos de información primaria: identificación de áreas de ocurrencia de inundación y de peligro, información hidrométrica y topobatemétrica, y niveles máximos alcanzados por el río cuando se presentaron inundaciones, información validada en terreno consultada con los pobladores aledaños y las entidades locales.

El trabajo de campo incluyó mediciones detalladas de caudal tomadas mediante un medidor de flujo Electro-magnético OTT MF Pro, realizadas a diferentes horas del día en secciones (previamente definidas) utilizadas posteriormente como condiciones de contorno para el modelo hidráulico. El medidor de flujo implementa uno de los métodos directos más usados: Método Área-Velocidad [29], dicho método consta del cálculo de tres velocidades a diferentes alturas V_{20} , V_{60} , y V_{80} de la profundidad total, es decir, mide la velocidad de la corriente en varios puntos de la misma vertical y en varias verticales de la sección del cauce; simultáneamente se miden las profundidades en cada vertical y el ancho del cauce, donde finalmente el dispositivo arrojó para cada sección un valor de caudal en unidades volumétricas por unidad de tiempo. Se realizó un levantamiento fotogramétrico usando un dron DJI Phantom 3 Advance con un cámara de 12.4 Megapíxeles. El dominio del modelo se cubrió con la información de dos misiones desde una altura de 100 m, obteniendo una resolución de 4.3 centímetros por pixel. Las misiones fueron realizadas con un 85% de superposición entre cada imagen, una velocidad promedio y un ángulo de cámara perpendicular al suelo. La construcción del modelo digital de superficie se realizó mediante el software Pix4Dmapper [30]. Este modelo de digital de superficie se corrigió con la información batimétrica para generar un modelo topobatemétrico completo del caso de estudio. Esto fue posible gracias a que se tomaron mediciones topográficas precisas en el terreno utilizando una estación total, obteniendo la información topográfica de las secciones del río, donde se cubrieron secciones uniformes de un talud al otro de forma perpendicular al cauce, con una separación máxima de 30 m, representando el terreno y las profundidades del lecho del río en el dominio computacional.

Modelo Hidráulico Unidimensional

La modelación hidráulica unidimensional del caso estudio se realizó mediante el modelo HEC-RAS. Hoy en día existe gran variedad de modelos comerciales y libres reconocidos en el análisis numérico unidimensional (1D), entre los más importantes están el modelo MIKE 11, SOBEK, ISIS, HEC-RAS y TELEMAC-MASCARET; entre ellos se destaca HEC-RAS del centro de ingeniería hidrológica del cuerpo de ingenieros del ejército de Estados Unidos, por ser un software de dominio público, sencillo y de amplia difusión, que permite resolver la gran mayoría de problemas que podemos encontrar en sistemas hidráulicos formados por un canal o una red abierta o cerrada de canales, permitiendo obtener el mapeo de inundaciones y la evaluación del peligro en distintas zonas [31].

En la construcción del modelo 1D se utilizó el complemento HEC-GEORAS para obtener las secciones transversales del modelo digital de terreno, importándolas al modelo hidráulico donde se dibujaron las

bancas del lecho y la dirección del flujo. Las secciones transversales se dibujaron perpendiculares al flujo cada 10 metros, distanciamiento en el que se obtuvo la información de campo en el caso de estudio. Las condiciones numéricas del flujo en el modelo se estipularon a partir de los caudales medidos en las salidas de campo y los caudales máximos calculados para distintos periodos de retorno (2.33 y 100 años), en un régimen permanente como condición de entrada. Las condiciones de frontera se establecieron a partir de las pendientes del río, donde debido a los cambios bruscos de estas pendientes se seleccionó el régimen de flujo mixto, tomándose condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo. Es importante indicar que el modelo HEC-RAS usa los valores de pendiente para determinar la profundidad normal, la cual se puede implementar para calibrar el modelo ya que los valores ingresados de las pendientes fueron tomados en campo. Finalmente, se registraron los valores del coeficiente de Manning (n) teniendo en cuenta las características físicas del canal y los bancos (derecha e izquierda), obtenidas en las salidas de campo y según lo propuesto por el método del servicio de conservación de suelos de Estados Unidos en [32].

En la calibración del modelo se determinó primero cuál de los parámetros hidráulicos es el más sensible en la modelación, para lo cual se tomó un caudal permanente como condición de entrada y se fueron variando los parámetros, revisando los resultados en cada simulación y verificando los cambios en ellos, donde finalmente se seleccionó el coeficiente de rugosidad de Manning como parámetro ideal para el proceso.

Para la calibración se tuvieron en cuenta las mediciones de caudales y la toma de niveles en la sección aguas arriba y abajo obtenidas en las salidas de campo, donde la altura máxima de la lámina de agua medida coincidió con la generada por el modelo hidráulico para los caudales aforados. Lo anterior, se logró a través de la variación de los coeficientes de rugosidad del canal hasta ajustar el modelo, utilizándose como criterio de calibración el error cuadrático medio (ECM) y la raíz del error cuadrático medio (RECM) de los datos observados en campo y los obtenidos en el modelo hidráulico [33], como se denota en la Ecuación (4) y la Ecuación (5).

$$ECM = \frac{1}{N} \sum_j^N (M_j - P_j)^2 \quad (4)$$

$$RECM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_j^N (M_j - P_j)^2} \quad (5)$$

Donde N es el número de datos; j valor inicial de los datos; M_j es la variable modelada obtenida del modelo hidráulico y P_j es la variable observada, tomada mediante los datos de campo en el caso de estudio.

Resultados y Discusión

Una vez efectuado el método de proporciones normales a la información del caudal del río Pamplonita suministrada por el IDEAM, se obtuvieron los datos faltantes necesarios para aplicar la estadística de Gumbel y determinar los caudales máximos para cada periodo de retorno. En la Figura 2 se presenta inicialmente la variación anual del caudal máximo del río para el periodo comprendido entre 1990 y 2018, evidenciándose que los mayores caudales se presentaron en los años 2007, 2010 y 2011 con valores de 69.21, 82.31 y 65 m³/s respectivamente. Es importante mencionar, que estos valores máximos se deben al fenómeno de la

Niña presentado en Colombia entre el año 2010 y 2011, afectando fuertemente al departamento de Norte de Santander con inundaciones y deslizamientos de tierra. Con los valores de los caudales máximos se aplica el proceso estadístico para estimar los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno, obteniéndose como parámetros de registro estadístico una desviación estándar de los datos de 16.043, una media aritmética de 39.661 m³/s y los parámetros de la probabilidad (α) y (u) de 14.522 y 31.903 respectivamente.

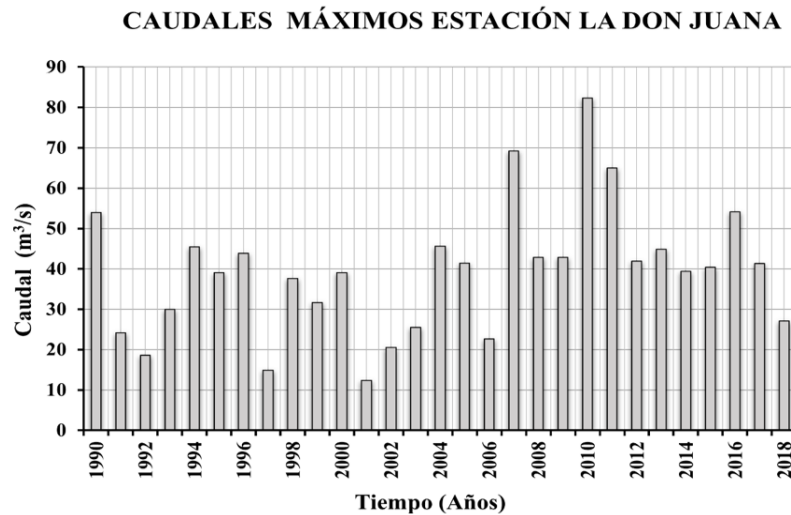


Figura 2. Variación anual del caudal máximo

En la Tabla I se presenta los resultados de la proyección de caudales máximos para distintos periodos de retorno, evidenciándose que para periodos retorno pequeños los caudales son menores en comparación de los valores obtenidos para periodos grandes, comprobando la consistencia de la aplicación del método de Gumbel para la proyección de caudales según la literatura. Así mismo, se puede observar en la Tabla I los valores de caudal para los distintos periodos de retorno (2.33 y 100 años) que se utilizaron para modelar el comportamiento del cauce en régimen permanente, donde según la distribución de Gumbel para un periodo de 2.33 años se tiene un caudal de 25.31 m³/s y para 100 años se alcanza un valor de 98.71 m³/s.

Tabla I. Proyección de Caudales Máximos para distintos periodos de retorno.

Periodo de Retorno	Probabilidad de Superar	Probabilidad de ser inferior (F(x))	Caudal (x) en (m ³ /s)
2.33	0.430	0.570	25.31
5	0.200	0.800	53.69
10	0.100	0.900	64.58
20	0.050	0.950	75.04
25	0.040	0.960	78.35
50	0.020	0.980	88.57
100	0.010	0.990	98.71
200	0.005	0.995	108.81
500	0.002	0.998	122.14

En la configuración del modelo se tuvo en cuenta el cambio de rugosidad del río en las orillas de la margen derecha e izquierda, cambiando el coeficiente de Manning en las secciones correspondientes. Se evidenció que al inicio del tramo la vegetación en la margen derecha es muy mínima, presentándose pastizales sin

arbustos (pastos cortos), y a medida que se avanza se da la presencia de vegetación (arbustos o matorrales), y en la planicie de inundación aumenta de manera progresiva hasta el final del tramo. De acuerdo a esto se estableció un valor de 0.03 (pastos cortos) entre las secciones 1-5, entre las secciones 6 y 8 un valor de 0.011 (muro de concreto) y entre la 9 y 20 un valor de 0.05 (arbustos escasos, mucha maleza).

La vegetación en la margen izquierda desde el inicio del tramo es notoria, se evidencian pastos altos y pequeños matorrales. A medida que avanza se ve que la presencia de vegetación aumenta de manera progresiva hasta el final. Por lo anterior, se tomó un valor de 0.035 (pastos altos) entre las secciones 1-3; un valor de 0.05 (pequeños matorrales y árboles en invierno) entre las secciones 4-6 y 8-13, en la sección 7 un valor de 0.03 (pastos cortos); entre las secciones 14 y 18 un valor de 0.011 correspondiente a la canalización y finalmente las secciones 19 y 20 un valor de 0.035 (pastos altos).

En la calibración del modelo se estableció como condición de frontera de entrada que el caudal fuera considerado constante en todo el tramo modelado y los niveles del flujo si cambiaran en cada sección. Para un mejor ajuste de la calibración se decidió solo variar el coeficiente de Manning en el lecho del río, pues presenta un comportamiento uniforme en todo el tramo, diferente a las orillas, ya que estas tienen condiciones distintas. En la Tabla II se presenta los valores obtenidos para la calibración del modelo con un coeficiente de Manning en el lecho del cauce de 0.12 en cada sección, observándose que el nivel promedio de la lámina de agua medida en campo y la profundidad media del modelo hidráulico son muy similares, y en solo tres secciones (3, 9 y 15), los valores del modelo se encuentran un poco desfasados (0.05, 0.05 y 0.11 m respectivamente), pero son valores admisibles considerando las limitaciones del modelo hidráulico unidimensional para representar verdaderamente el caso de estudio.

Tabla II. Valores obtenidos de la calibración del modelo

Sección	Nivel promedio medido en campo (m)	Nivel promedio del modelo hidráulico (m)	Coficiente de Manning (n) lecho del río
1	0.92	0.92	0.12
2	0.98	0.98	0.12
3	1.30	1.41	0.12
4	1.0	1.01	0.12
5	1.20	1.20	0.12
6	0.85	0.82	0.12
7	0.97	0.99	0.12
8	0.70	0.69	0.12
9	1.15	1.20	0.12
10	1.05	1.03	0.12
11	1.06	1.09	0.12
12	1.18	1.20	0.12
13	1.26	1.27	0.12
14	1.17	1.20	0.12
15	1.10	1.15	0.12
16	1.02	1.06	0.12
17	0.99	1.01	0.12
18	0.82	0.80	0.12
19	0.60	0.58	0.12
20	0.96	0.97	0.12

Los resultados obtenidos del SME y RSME son de 0.00121 y de 0.03478 respectivamente, evidenciando que los valores modelados y observados en campo son muy cercanos y se presenta buen ajuste de la calibración realizada al modelo, además permite confirmar que los valores de los coeficientes de Manning seleccionados fueron óptimos para la modelación del caso de estudio y que el procesamiento de la información tomada en campo junto con la selección de las condiciones iniciales y de frontera en el modelo fueron las indicadas.

Una vez calibrado el modelo se incorporaron los caudales máximos calculados para los periodos de retorno (TR), obteniendo las profundidades del agua, las velocidades y el área de inundación en el caso de estudio. Es importante indicar, que para las figuras que se muestran a continuación la línea en color azul (WS TR) representa la profundidad máxima alcanzada para el periodo de retorno simulado, la línea en puntos rojos (Crit TR) el tirante crítico, la línea en color negro con un punto el terreno y los puntos rojos los bancos u orillas del cauce registrados en las campañas de campo. La orientación de las secciones se tomó de arriba hacia abajo del tramo estudiado.

En la Figura 3 se presentan las profundidades del agua en la sección inicial del tramo para los diferentes periodos de retorno, observándose que el nivel máximo del agua para un TR de 2.33 años es de 1.45 m, sobrepasando por muy poco la orilla de la margen izquierda del cauce, el tirante crítico obtenido en la simulación para este periodo es de 0.90 m, alcanzando una elevación de 717 msnm. Por el contrario, para un TR de 100 años el nivel máximo obtenido es 2.67 m sobrepasando de manera considerable los bancos de la sección y alcanzando un valor de 1.22 m mayor que para un TR de 2.33 años. El tirante crítico para 100 años toma un valor de 1.53 m superando una elevación de 717.63 msnm, 0.63 m más alto que para el TR inferior.

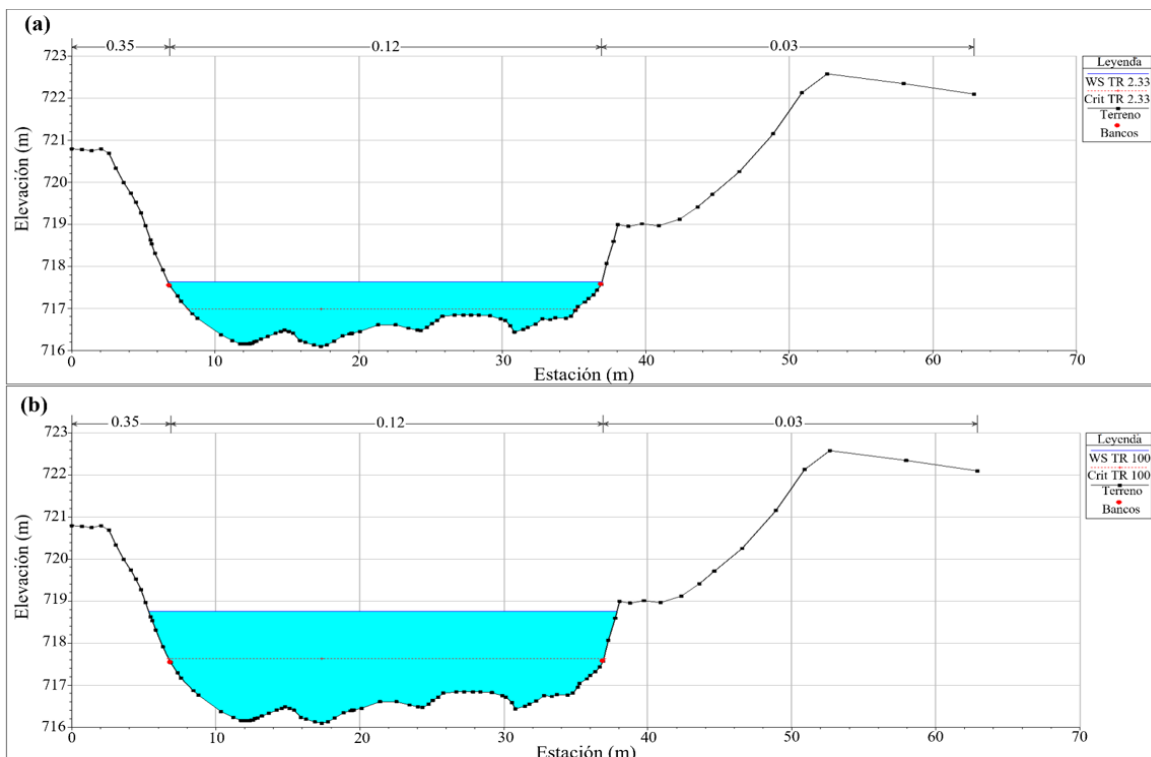


Figura 3. Profundidad del agua en la sección inicial, (a) TR de 2.33 años, (b) TR 100 años

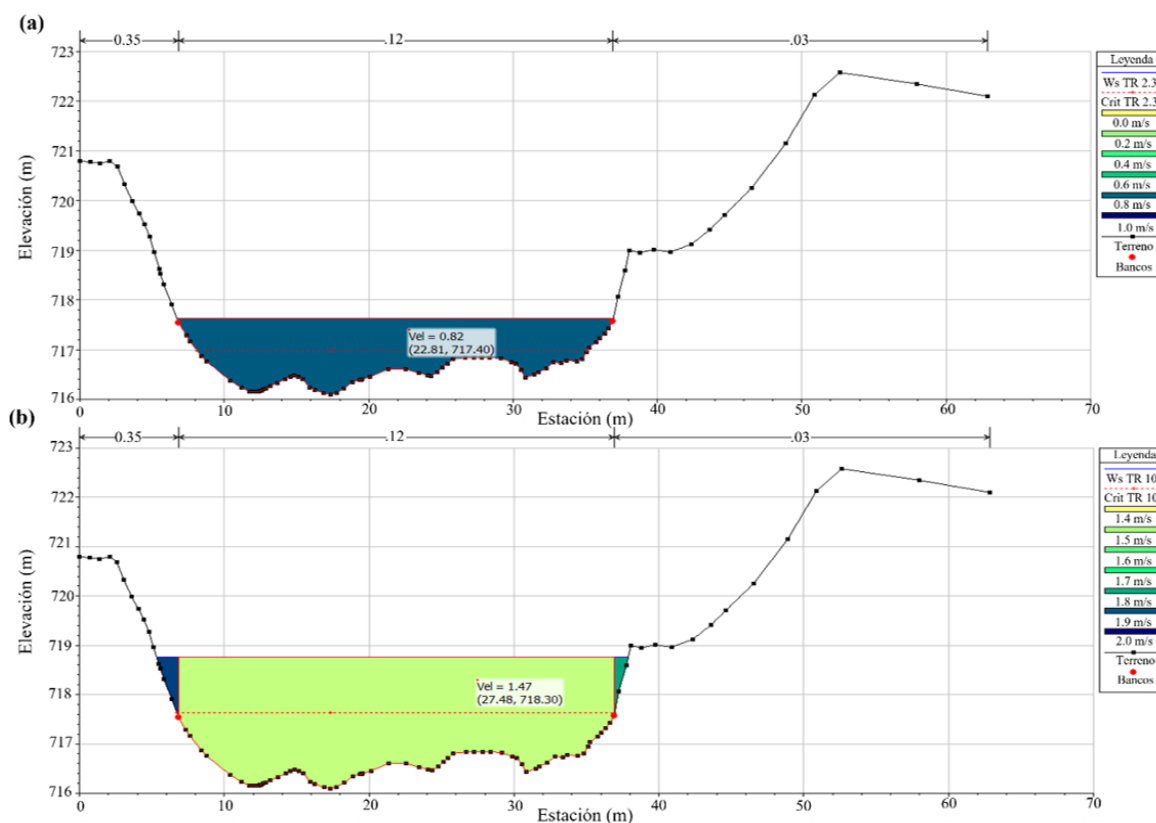


Figura 4. Velocidades de flujo en la sección inicial del tramo, (a) TR de 2.33 años, (b) TR 100 años

La Figura 4 muestra las velocidades en la dirección predominante del flujo (dirección x) presentadas en la sección inicial para los periodos de retorno simulados, observándose que para el TR de 2.33 años (Figura 4(a)) la distribución de velocidades a lo largo de la sección es uniforme alcanzando un valor de 0.82 metros sobre segundos (m/s). Para el periodo de retorno de 100 años (Figura 4(b)) las velocidades si cambian en la sección, presentando valores entre 1.47 hasta 1.93 m/s. Se observa que en la margen izquierda y derecha las velocidades son mayores a las obtenidas en el centro de la sección, correspondiendo a que en estas zonas el agua supera el nivel máximo nivel del cauce y se desborda por las orillas, donde el tipo de material son arbustos o pastos cortos, y la fricción que se genera es menor en comparación a la del lecho del río, aumentando la velocidad en estas zonas de inundación.

En la sección final del tramo (Figura 5 y 6), el cauce no sufre desbordamiento para los periodos de retorno simulados, dado a que en esta zona el río presenta un encausamiento en la margen izquierda y derecha por los muros de contención construidos para proteger la infraestructura existente (viviendas y la vía principal Pamplona - Cúcuta). Para el TR de 2.33 años la lámina de agua alcanza una altura de 1.02 m, un tirante crítico de 0.6 m y presenta una velocidad uniforme en la sección de 1.08 m/s. Por el contrario, la profundidad del agua aumenta para el TR de 100 años obteniendo un valor de 2.11 m con un tirante crítico de aproximadamente 1.30 m. La distribución de la velocidad en la sección se presenta uniforme alcanzando un valor de 1.80 m/s, siendo uno de los más altos en relación a los demás presentados en las diferentes secciones en el interior del cauce. Es importante aclarar, que lo anterior se debe a que el río es encausado

reduciendo su perímetro y área mojada, teniéndose que el flujo acelerar para poder conservarse (principio de conservación de la masa), por lo cual se presentan estas velocidades mayores.

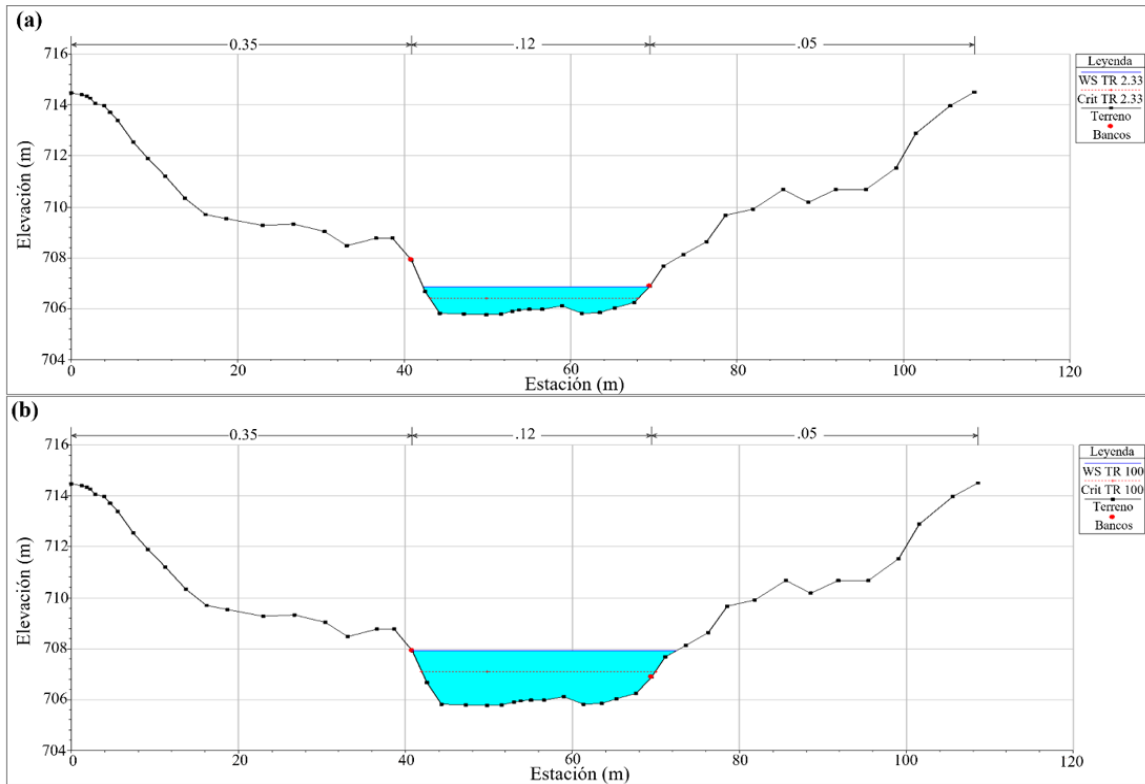


Figura 5. Profundidad del agua en la sección final del tramo, (a) TR de 2.33 años, (b) TR 100 años

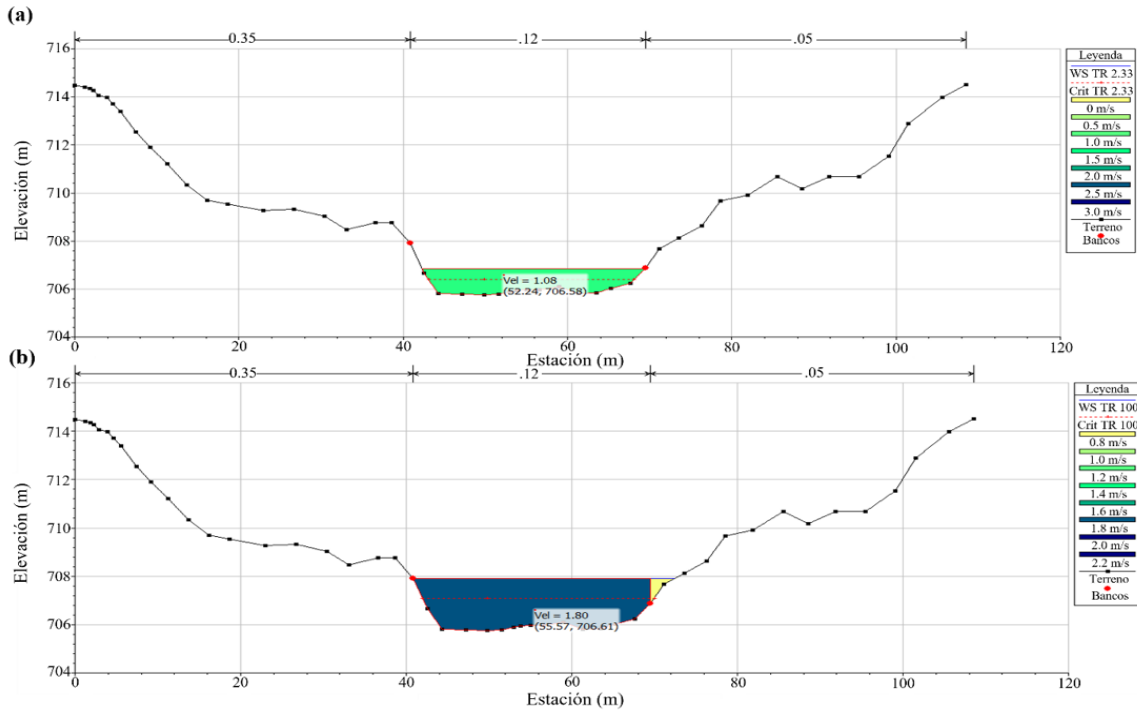


Figura 6. Velocidades de flujo en la sección final del tramo, (a) TR de 2.33 años, (b) TR 100 años

En la Figura 7 se presenta la mancha de inundación generada por las inundaciones cuando se modela un caudal máximo para distintos periodos de retorno. Como se observa en la Figura 7(a) para un TR de 2.33 años, el flujo se empieza a desbordar en la margen izquierda desde el inicio del tramo en estudio, el cual no afecta de forma considerable a la población ya que la profundidad del agua es baja y no alcanza las viviendas que se encuentran cercanas, sin embargo, sí genera afectación a los cultivos sembrados en estas áreas, ya que gran parte de esta es utilizada para actividades agrícolas y ganaderas, causando pérdidas económicas a la comunidad. En las secciones aguas abajo se presentan desbordamientos sobres los bancos menos elevados, pero no genera afectación a las construcciones cercanas debido a la presencia de muros de contención que impiden el paso del agua. Por el contrario, para un caudal con un periodo de retorno de 100 años Figura 7(b) la afectación en gran parte del cauce es mayor, pues las profundidades del agua son altas alcanzando afectar algunas viviendas que se encuentran en las secciones iniciales y a la mitad del tramo.

En la sección a la mitad del cauce la profundidad de flujo se presenta diferente (Figura 7) debido a la topografía del terreno, la margen izquierda es más baja permitiendo que el flujo se desborde por las orillas formando llanuras de inundación. Como se observa en la Figura 7(a) para un TR de 2.33 años la altura del agua alcanza un nivel considerable desbordándose en la margen izquierda del río. De igual forma, se puede evidenciar en el TR de 100 años (Figura 7(b)) que la lámina de agua supera los bancos de la sección con una altura mayor, desbordándose hacia la planicie de inundación. Es importante indicar, que en este punto del tramo existe infraestructura cercana a la ronda del río, produciendo un peligro latente a las personas que viven en este sector de sufrir volcamiento o deslizamiento por la fuerza del agua, siendo arrastradas hacia la corriente del cauce. Así mismo, las inundaciones afectarían a las viviendas aledañas, pues estas pueden empezar a presentar procesos de socavación, debilitando la estructura.

La Figura 7, permite también observar el comportamiento del flujo en el río para los dos periodos de retorno: 2.33 y 100 años, donde se evidencia que hay una marcada diferencia para las zonas de inundación, obteniendo áreas inundables de 0.75 y 1.20 hectáreas respectivamente. Así mismo, permite identificar zonas de mayor impacto donde las profundidades del agua alcanzaron alturas y anchos considerables. Esto nos muestra el potencial de los ríos de montaña para generar estos eventos de inundación con flujos turbulentos que crean desgaste en los materiales en las márgenes del cauce, causando procesos de remoción de masas que afectaría a la población cercana.

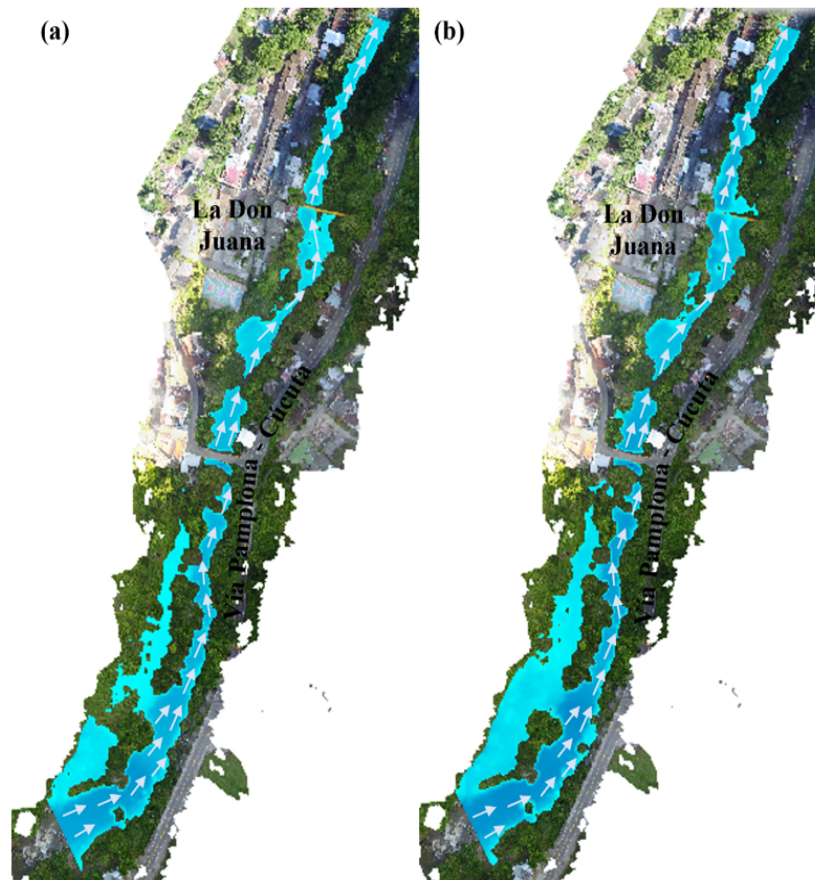


Figura 7. Mancha de inundación en el caso de estudio, (a) TR de 2.33 años, (b) TR 100 años

Conclusiones

El proceso de calibración obtenida es confiable según los resultados obtenidos de 0.00121 y 0.03478 para el SME y RSME respectivamente, describiendo un buen ajuste de los cálculos numéricos obtenidos al compararlos con la información recolectada en el caso de estudio, lo que implica que el modelo hidráulico unidimensional (1D) construido es potencialmente útil en el análisis de zonas propensas a inundaciones para diferentes eventos de caudales históricos. Sin embargo, existen algunas limitaciones para el modelo en predecir las inundaciones en los escenarios de planificación de mediano o largo plazo, dado que los procesos hidrológicos pueden cambiar con la rápida urbanización de los pobladores aledaños al sitio de estudio.

El modelo hidráulico propuesto en esta investigación para un río de montaña permitió generar los mapas de inundación para los periodos de retorno de 2.33 y 100 años con rangos de profundidades y velocidades de flujo, conociendo las áreas inundables de 0.75 y 1.20 hectáreas respectivamente e identificando las zonas de mayor impacto donde la lámina del agua alcanzó alturas y anchos considerables. Así mismo, se pudo evidenciar el peligro latente de las personas que viven en este sector y las pérdidas que causaría al sector económico con las afectaciones a los cultivos cuando se presenten este tipo de inundaciones en el caso de estudio.

El modelo hidráulico unidimensional propuesto en esta investigación contribuye en gran parte a disminuir la brecha que presentan las comunidades de países en vía de desarrollo como Colombia, ya que no cuentan con herramientas computacionales que permiten la modelación de los ríos de montaña o arroyos cercanos a los asentamientos de personas, para conocer la respuesta de estos ante diferentes eventos de precipitación. Ayudando a los tomadores de decisiones a comprender la vulnerabilidad de las poblaciones a cambios en el clima, con el fin de buscar alternativas de prevención y mitigación, permitiendo que las comunidades sean más resilientes ante impactos futuros.

A nivel mundial los eventos de inundación y el peligro asociado es un tema que cada día es más preocupante, por lo cual, se recomienda desarrollar como trabajo futuro una investigación que permita conocer la respuesta del caso de estudio incluyendo los impactos del cambio climático como nueva estrategia e implementando una modelación hidráulica bidimensional (2D) o tridimensional (3D) para mejorar los resultados en la determinación de zonas de inundación en este río de montaña.

Referencias

- [1] J. Han y S. He, “Urban flooding events pose risks of virus spread during the novel coronavirus (COVID-19) pandemic”, *Sci. Total Environ.*, vol. 755, n. ° 142491, 2021. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142491
- [2] Y. Hirabayashi et al., “Global flood risk under climate change”, *Nat. Clim. Chang.*, vol. 3, n. ° 9, pp. 816–821, 2013.
- [3] C. Panos, J. Wolfand, y T. Hogue, “Assessing resilience of a dual drainage urban system to redevelopment and climate change”, *J. Hydrol.*, vol. 596, n. ° 126101, 2021. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126101
- [4] A. Kumar, A. K. Gupta, R. Bhambri, A. Verma, S. K. Tiwari, y A. Asthana, “Assessment and review of hydrometeorological aspects for cloudburst and flash flood events in the third pole region (Indian Himalaya)”, *Polar Sci.*, vol. 18, pp. 5–20, 2018. doi: 10.1016/j.polar.2018.08.004
- [5] Z.-Q. Zhou, S.-P. Xie, y R. Zhang, “Historic Yangtze flooding of 2020 tied to extreme Indian Ocean conditions”, *Earth, atmospheric, planet. Sci.*, vol. 18, n. ° 12 e2022255118, 2021. doi: 10.1073/pnas.2022255118
- [6] A. Sarhadi, S. Soltani, y R. Modarres, “Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis”, *J. Hydrol.*, vol. 458-459, pp. 68–86, 2012. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.039
- [7] J. Liu, W. Shao, C. Xiang, C. Mei, y Z. Li, "Uncertainties of urban flood modeling: Influence of parameters for different underlying surfaces", *Environmental Research*, vol. 182, no. 108929, 2019. doi: 10.1016/j.envres.2019.108929.
- [8] Q. Chen, B. Guo, C. Zhao, y J. Zhang, “A comprehensive ecological management approach for northern mountain rivers in China”, *Chemosphere*, vol. 234, n. ° 2019, pp. 25–33. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.06.042

- [9] M. B. A. Sawaf, y K. Kawanisi, “Assessment of mountain river streamflow patterns and flood events using information and complexity measures”, *J. Hydrol.*, vol. 590, n. ° 125508, 2020. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125508.
- [10] D. Mihailović, E. Nikolić-Đorić, N. Drešković, y G. Mimić, “Complexity analysis of the turbulent environmental fluid flow time series”, *Physica A: Statistical Mechanics its Appl.*, vol. 295, pp. 96–104, 2014. doi: 10.1016/j.physa.2013.09.062
- [11] G. Technica, “Integrated Surveying for the Archaeological”, *Geographia Technica Assoc.*, vol. 11, n. ° 2, pp. 39–50, 2016.
- [12] A. ShahiriParsa, M. Noori, y M. Rashidi, “Floodplain Zoning Simulation by Using HEC-RAS and CCHE2D Models in the Sungai Maka River”, *Air Soil. Water Res.*, vol. 9, pp. 55–62, 2016. doi: 10.4137/ASWR.S36089
- [13] J. Pinos y L. Timbe, “Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins”, *Water Sci. Eng.*, vol. 12, n. ° 1, pp. 11–18, 2019. doi: 10.1016/j.wse.2019.03.001
- [14] G. D. Baldassarre, F. Laio, y A. Montanari, “Design flood estimation using model selection criteria”, *Phys. Chemistry Earth*, vol. 34, pp. 606–611, 2009. doi: 10.1016/j.pce.2008.10.066
- [15] S. Cohen et al., “Estimating floodwater depths from flood inundation maps and topography”, *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.*, vol. 54, pp. 847–858, 2017. doi: 10.1111/1752-1688.12609
- [16] O. A. Ibrahim, D. W. Goshime, S. T. Gebrekirtos, y R. Absi, “Panacea to the catastrophe through mapping in anticipation of mitigating the flood magnitude along Wabi Shebele River Basin of Somalia”, *Natural Hazards Res.*, 2023. doi: 10.1016/j.nhres.2023.11.001
- [17] P. A. Basile, G. Riccardi, F. Peruzzo, y M. Garcia, “Two-dimensional hydrodynamic modelling of the lower Parana River”, *Aqua-LAC*, vol. 8, n. ° 2, pp. 1–13, 2016.
- [18] E. E. Wohl y D. M. Thompson, “Velocity characteristics along a small step-pool channel”, *Earth Surf. Processes Landforms*, vol. 25, pp. 353–367, 2000. doi: 10.1002/(SICI)1096-9837(200004)25:4%3C353::AID-ESP59%3E3.0.CO;2-5
- [19] A. N. Papanicolaou, A. Bdour, y E. Wicklein, “One-dimensional hydrodynamic/sediment transport model applicable to steep mountain streams”, *J. Hydraulic Res.*, pp. 357–375. doi: 10.1080/00221686.2004.9728402
- [20] A. Casas, G. Benito, V. Thorndycraft, y M. Rico, “The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling”, *Earth Surf. Process. Landf.*, vol. 31, n.° 4, 2006. doi: 10.1002/esp.1278

- [21] E. Bladé, L. Cea, y G. Corestein, “Modelización numérica de inundaciones fluviales”, *Ing. Del Agua*, vol. 18, n. ° 1, 2014. doi: 10.4995/ia.2014.3144
- [22] G. Papaioannou, A. Loukas, L. Vasiliades, y G. T. Aronica, “Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modelling approach”, *Nat. Hazards*, vol. 83, pp. 117–132, 2016. doi: 10.1007/s11069-016-2382-1
- [23] Y. E. Rodríguez Pérez, J. A. Ramón Valencia, y J. H. Suárez Gélvez, “Conceptual framework for watershed management based on the systematization of the pilot project for Colombia of the Pamplonita river basin”, *Respuestas*, vol. 23, n. ° 2, pp. 96–109, 2018. doi: 10.22463/0122820X.1742
- [24] Minambiente, “Acuerdo de voluntades plataforma colaborativa rio Pamplonita”, *Minist. Ambient.*, 2021. Disponible en: www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/08/acuerdo-de-voluntades-plataforma-colaborativa-rio-pamplonita.pdf
- [25] CORPONOR, “Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Pamplonita”. Cúcuta, 2010. Disponible en: http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.111762/22602/37-POMCH_Pamplonita_ajustado.pdf;jsessionid=094FB5BF1A71C2A64D3BD91FDE61456A?sequence=1
- [26] D. Mena Rentería, M. Á. Cañón Ramos, y A. M. Suárez Rodríguez, “Modelación de los impactos de los escenarios de cambio climático en la cuenca del río Pamplonita en Norte de Santander”, *EIA*, vol. 17, pp. 1–12, 2020. doi: 10.24050/reia.v17i33.1265
- [27] L. Vargas-Garay, O. Torres-Goyeneche, y G. Carrillo-Soto, “Evaluation of SCS - unit hydrograph model to estimate peak flows in watersheds of Norte de Santander”, *Respuestas*, vol. 24, n. ° 1, pp. 6-16, 2019. doi: 10.22463/0122820X.1743
- [28] D. A. Castro-Llanos y Y. Carvajal-Escobar, “Análisis de tendencia en la precipitación pluvial anual y mensual en el departamento del Valle del Cauca”, *Memorias*, vol. 11, n.° 20, pp. 9–18, 2013.
- [29] V. Martínez Alvarez, A. I. García García, y F. Ayuga Téllez, “Monitorización de dos cuencas hidrológicas en la comunidad de Madrid mediante el empleo de sensores doppler para el aforo de corrientes”, *Ing. Del Agua*, vol. 11, n. ° 2, pp. 201–210, 2004. doi: 10.4995/ia.2004.2528
- [30] T. Caputo et al., “Estimation of the Uncertainties Introduced in Thermal Map Mosaic: A Case of Study with PIX4D Mapper Software”, *remote sens.*, vol. 15, n. ° 18, p. 4385, 2023. doi: 10.3390/rs15184385
- [31] Namara, W.G., Damisse, T.A., y Tufa, F.G. “Application of HEC-RAS and HEC-GeoRAS model for Flood Inundation Mapping, the case of Awash Bello Flood Plain, Upper Awash River Basin, Oromiya Regional State, Ethiopia. Model”. *Earth Syst. Environ.* Vol. 8, pp. 1449–1460 (2022). doi: 10.1007/s40808-021-01166-9
- [32] N. Francisco Nicolás, A. Turrent-Fernández, H. E. Flores-López, M. R. Martínez-Menes, y J.

- F. Enríquez–Quiroz, “Estimación del escurrimiento superficial con el método SCS–CN en el trópico subhúmedo de México”, *Terra Latinoam.*, vol. 28, n.º 1, pp. 71–78, 2010.
- [33] Palacio, C., García, F., y García, U. “Calibración de un modelo hidrodinámico 2D para la bahía de Cartagena”. *DYNA(Colombia)*, vol. 77, n.º 164, pp.152–166, 2010.