

Evaluación Espaciotemporal de la Peligrosidad en Peatones por Inundaciones Urbanas Basada en un Modelo Hidrodinámico de Drenaje Dual

Spatiotemporal Assessment of Urban Flood Hazard to Pedestrians Based on a Dual Drainage Hydrodynamic Model

Diego Iván Sánchez Tapiero¹, Carlos Alexis Bonilla Granados², Jarol Derley Ramon Valencia³

¹M. Sc en Ingeniería Ambiental, Docente e Investigador de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Grupo de Investigación Etenoha, Pamplona, Colombia.

²PhD en Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Docente e Investigador de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Grupo de Investigación Etenoha, Pamplona, Colombia.

³PhD en Ingeniería Ambiental, Docente e Investigador de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Grupo de Investigación GIAAS, Pamplona, Colombia.

e-mail: diego.sanchez@unipamplona.edu.co

Cite this article as: D. Sanchez Tapiero, C. Bonilla Granados, J. Ramon Valencia
“Evaluación Espaciotemporal de la Peligrosidad en Peatones
por Inundaciones Urbanas Basada en un Modelo Hidrodinámico de Drenaje Dual”,
Prospectiva, Vol. 23 N° 2 2025

Recibido: 03/05/2025 / Aceptado: 24/07/2025

<http://doi.org/10.15665/rp.v23i2.3757>

RESUMEN

El riesgo asociado a las inundaciones urbanas es una problemática creciente en ciudades de todo el mundo, convirtiéndose en un factor delicado en los países en vía de desarrollo, donde el peligro para peatones por inestabilidad es menos estudiado y comprendido. Este artículo de investigación presenta la evaluación espaciotemporal de la peligrosidad en peatones por inestabilidad debido a las inundaciones pluviales, basándose en resultados obtenidos de la modelación hidrodinámica de una cuenca urbana de la ciudad de Cúcuta, Colombia. El modelo se desarrolló en la herramienta computacional de gestión de aguas pluviales por computadora (PCSWMM), el cual permitió obtener la velocidad y la profundidad del agua de las inundaciones en las vías, generadas para diferentes periodos de retorno (50 y 100 años). El modelo fue calibrado mediante datos observados de la profundidad del agua, obtenidos del análisis de técnicas de visión artificial en Matlab. Las variables hidráulicas obtenidas del modelo hidrodinámico permitieron analizar la variación espacial y temporal de la peligrosidad en peatones, para los distintos periodos de retorno en el caso de estudio. La evaluación realizada dio a conocer las vías con sectores de peligrosidad alta, media y baja para peatones y estimar los cambios desde el inicio hasta el final del evento de lluvia, lo cual contribuye a los responsables en la toma de decisiones de la ciudad, en tener conocimiento de las vías propensas a generar niveles altos de peligro, con el fin de buscar alternativas de prevención y mitigación ante impactos futuros del clima.

Palabras Clave: Peligrosidad en peatones; inundaciones urbanas, evaluación espaciotemporal, modelación hidrodinámica.

ABSTRACT

The risk associated with urban flooding is a growing problem in cities around the world, becoming a critical factor in developing countries, where the danger posed to pedestrians due to flow instability remains less studied and understood. This research article presents a spatiotemporal assessment of pedestrian hazard due to instability caused by pluvial flooding, based on results obtained from the hydrodynamic modeling of an urban catchment in the city of Cúcuta, Colombia. The model was developed using the Personal Computer Storm Water Management Model (PCSWMM), which allowed the simulation of flow velocity and water depth along streets under flood conditions for different return periods (50 and 100 years). The model was calibrated using observed water depth data derived from computer vision techniques in MATLAB. The hydraulic variables obtained from the hydrodynamic model enabled the analysis of the spatial and temporal variation in pedestrian hazard levels for the different return periods considered in the study. The evaluation identified street segments with high, medium, and low levels of pedestrian hazard and estimated their changes throughout the rainfall event. These results provide valuable insights for local decision-makers to identify areas prone to elevated hazard levels and to support the development of preventive and mitigation strategies in the face of future climate impacts.

Keywords: *Pedestrian hazard; urban flooding, spatiotemporal assessment, Hydrodynamic modeling.*

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha intensificado los eventos extremos, como las lluvias intensas, que afectan significativamente la calidad de vida y han convertido los problemas ambientales en un eje prioritario de acción para los gobiernos [1]. En zonas urbanas, el aumento de superficies impermeables contribuye a una mayor escorrentía superficial [2]. Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), las precipitaciones y las inundaciones han aumentado más del 50 % en la última década, con una frecuencia cuatro veces mayor que en 1980 [3]. Estos cambios se evidencian mediante modelos climáticos globales que simulan variables como la precipitación [4], y reflejan alteraciones en el ciclo hidrológico debido a factores naturales y antropogénicos [5].

El aumento de zonas duras modifica la dinámica hídrica de las cuencas urbanas, reduciendo el tiempo de concentración y generando picos de caudal que superan la capacidad de los sistemas de drenaje pluvial [6]. Esta condición, sumada a las características locales, influye en la severidad de las inundaciones [7]. Reducir sus impactos se ha convertido en una prioridad para la gestión sostenible del agua [8], especialmente considerando que muchas muertes ocurren por personas que transitan en zonas inundadas [9]. Los peatones tienden a subestimar el efecto del flujo sobre su estabilidad, especialmente en zonas urbanas de montaña donde las altas pendientes aumentan las velocidades de flujo [10]. Este aspecto sumado al aumento de precipitaciones extremas en ciudades de todo el mundo hace que las inundaciones sean peligrosas para los peatones.

Según [11], la peligrosidad sucede ante cualquier evento natural amenazante, y no revela la ocurrencia de daños sino la posibilidad de que estos sucedan. Este concepto involucra la probabilidad e intensidad del peligro, lo que permite que los modelos hidrodinámicos sean un factor clave para abordar esta problemática [12]. Estos modelos, basados en ecuaciones físicas, permiten simular zonas inundables y evaluar el comportamiento de los sistemas de drenaje [13]. No obstante, la representación del entorno urbano y de la interacción entre el flujo superficial y la red subterránea sigue siendo un desafío [14], [15]. Hoy en día, los modelos de drenaje dual abordan esta limitación al representar con mayor precisión la dinámica conjunta entre la superficie y la red de alcantarillado [16], permitiendo generar mapas de peligro de inundación que suelen representarse bajo la distribución de la velocidad y la profundidad de flujo [17].

En la literatura existente se puede encontrar que la velocidad y la profundidad de flujo en la superficie permiten determinar el peligro en peatones a partir de criterios experimentales y mecánicos [18], [19]. La Agencia Federal de Gestión de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA), presentó por primera vez en 1979 un criterio para la condición límite a partir de la cual una persona adulta comienza a perder estabilidad [20]. Estudios desarrollados por el Departamento de Medio Ambiente, Inundaciones y Asuntos Rurales (DEFRA) y la Agencia Ambiental del Reino Unido incorporaron la probabilidad de exposición y de daño para caracterizar el peligro bajo fórmulas empíricas propuestas por [21]. Otros investigadores han propuesto fórmulas que integran experimentación de laboratorio y análisis mecánico del flujo [22], [23], [24], [25], destacando que los enfoques físico-mecánicos tienden a ofrecer mayor confiabilidad [26]. En este sentido, diversos estudios han acoplado modelos hidrodinámicos de drenaje dual con estos criterios para analizar el peligro sobre personas y vehículos en contextos urbanos [27], [28].

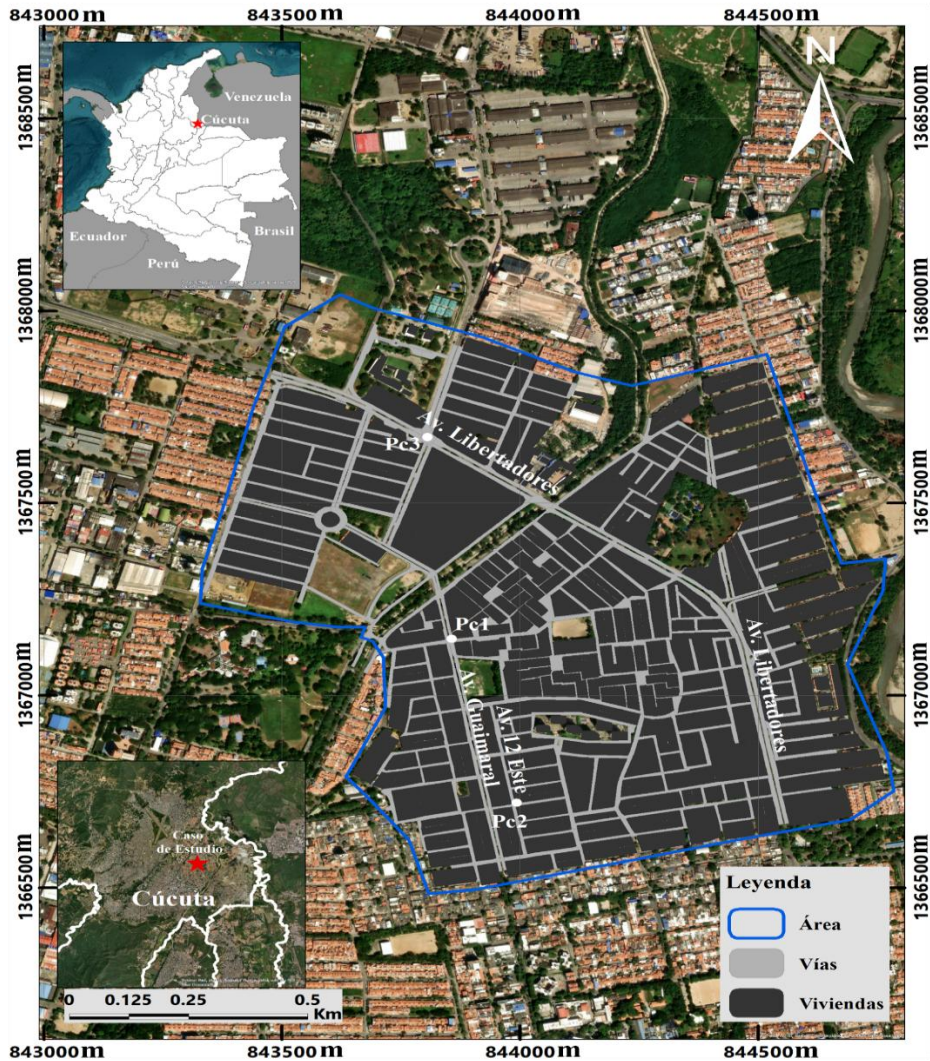
Por tanto, en este estudio se propuso la evaluación espaciotemporal del peligro en peatones durante inundaciones urbanas en la ciudad de Cúcuta, Colombia, integrando un modelo hidrodinámico de drenaje dual con fórmulas empíricas de peligrosidad. El modelo fue calibrado con datos de campo y utilizado para simular escenarios de distintos períodos de retorno, permitiendo analizar la evolución temporal y espacial de la velocidad, la profundidad y los niveles de peligro. Este enfoque proporciona información clave para la toma de decisiones en la planificación urbana, prevención del riesgo y diseño de medidas de mitigación.

2. LOCALIZACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio está ubicado al nororiente de la ciudad de Cúcuta (Figura 1), con una extensión superficial de 130.52 Hectáreas, es una cuenca densamente poblada, alcanzando un nivel de urbanización de aproximadamente del 83.5%, es ocupada principalmente por usos residenciales, comerciales e industriales, como el centro comercial Unicentro, Concesionario Ford y el Looping Park Cúcuta, entre otros. Para la evaluación de la peligrosidad se tomaron tres vías principales (Avenida Guaimaral, Avenida libertadores y Avenida 12 Este), analizándose puntos críticos que se presentan en esta zona por la influencia de muchas personas entre niños y adultos mayores que transitan por este lugar (Pc1, Pc2 y Pc3).

Presenta una condición de elevación de 275 metros sobre el nivel del mar (msnm) en las zonas más bajas y una elevación máxima de 285 msnm en las partes altas, las zonas de menor altura corresponden a la base del canal Bogotá. El intenso crecimiento urbano en la cuenca ha aumentado la escorrentía superficial en las vías, ya que la zona no cuenta con un sistema de drenaje urbano bien planificado, son pocos los conductos y canales que transportan el agua de lluvia. El sistema está conformado por tuberías y canales de sección cerrada que se encuentran mayormente cerca de la avenida Libertadores, permitiendo la evacuación del agua de escorrentía de una parte del caso de estudio, el resto fluye por las vías hasta llegar al canal Bogotá, que cumple la tarea de dirigir el flujo hasta su descarga en el río Pamplonita. Esta falta de conductos en el caso de estudio genera acumulación de flujo de escorrentía en las vías principales, permitiendo que en los últimos años se presenten inundaciones, lo cual aumenta la probabilidad de que una persona presente peligrosidad por transitar por estos lugares. Una descripción más detallada sobre el caso de estudio se encuentra en [29].

Figura 1. Localización del Caso de Estudio.
Figure 1. Case Study Location



3. METODOLOGÍA

La metodología se centra inicialmente en desarrollar el modelo hidrodinámico de drenaje dual, para lo cual se recopiló la información hidrológica y topográfica, necesaria para la construcción del modelo. Seguidamente, se corrió el modelo con la finalidad de conocer las velocidades y profundidades de flujo en las vías de las inundaciones simuladas para distintos periodos de retorno (T_r), permitiendo realizar la respectiva evaluación espaciotemporal de la peligrosidad en personas. A continuación, se describe a detalle las fases de la metodología.

3.1. Recopilación de información

La caracterización hidrológica se realizó a partir de los registros de precipitación disponibles en estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Se seleccionó la estación Aeropuerto Camilo Daza por su alta consistencia y confiabilidad, con más de 70 años de

información disponible. A partir de sus datos se identificaron las precipitaciones máximas mensuales en 24 horas durante el período 1970–2021 (49 años), y se aplicó la distribución de Gumbel para representar estadísticamente los meses más lluviosos. La estimación de las curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) se realizó siguiendo la metodología de [30], utilizando la formulación de Bernard (1932) para establecer los eventos de diseño según los períodos de retorno definidos [31].

La topografía del área de estudio fue levantada mediante un sistema de aeronave no tripulada (UAV), dividido en siete zonas con un traslape de imágenes del 85 % y una altura de vuelo de 100 m, obteniéndose una resolución espacial de 4.3 cm/píxel. Para el control y georreferenciación se empleó un sistema GPS/RTK GNSS con una precisión de 5 mm, referenciado al sistema MAGNA–Colombia Origen Este (EPSG 3117). La generación del Modelo Digital de Terreno (MDT) se llevó a cabo según la metodología de [32], e incluyó la planificación del vuelo, adquisición y procesamiento de imágenes, georreferenciación, limpieza y clasificación de nubes de puntos. El procesamiento fotogramétrico se realizó con el software Agisoft Metashape versión 1.6.5 [33].

3.2. Conceptualización del modelo hidrodinámico de drenaje dual

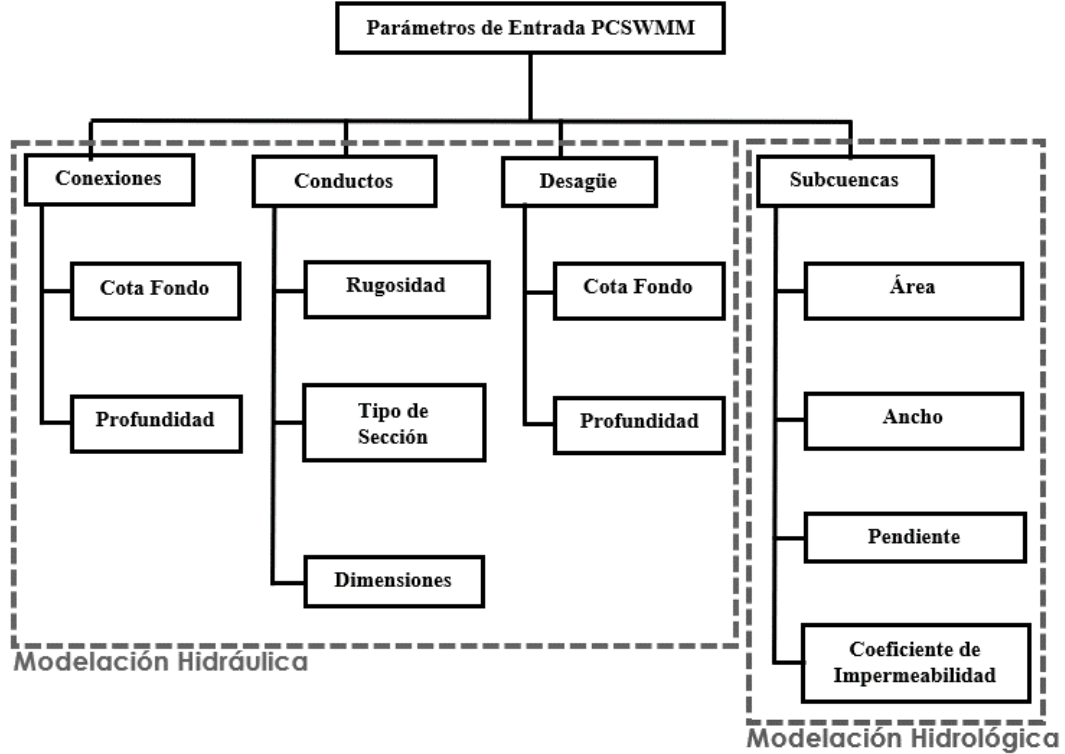
En la conceptualización del modelo se empleó el software de gestión de aguas pluviales por computadora (PCSWMM) en su versión 7.4.3240, de la empresa internacional de computación hidráulica (CHI), el cual utiliza el motor de cálculo hidrológico e hidráulico de SWMM5 [34], basado en la solución de las ecuaciones de Saint – Venant (Ecuación (1) y (2)), resueltas mediante el método de diferencias finitas con aproximaciones sucesivas, donde las variables Q , H y A representan el caudal, la carga hidráulica y el área de la sección transversal respectivamente. La aceleración gravitacional es g ; Sf es la pendiente de fricción del conducto; hl la pérdida de carga local por unidad de longitud, x la dirección en la que se moverá el fluido y t el tiempo [35].

$$\partial A / \partial t + \partial Q / \partial x = 0 \quad (1)$$

$$\partial Q / \partial t + \partial / \partial x (Q^2 / A) + gA \partial H / \partial X + gASf + gAhl = 0 \quad (2)$$

La Figura 2 presenta los parámetros de entrada requeridos en el modelo hidrodinámico desarrollado en el software, conformándose por conexiones, conductos, desagües y subcuencas; los tres primeros corresponden a la modelación hidráulica y el último a la hidrológica. El esquema de modelación bidimensional (2D) considera que la escorrentía superficial generada en cada subcuenca fluye inicialmente sobre la calle hasta ingresar a una conexión, generalmente un sumidero o una estructura de alcantarilla, donde es transportada a través de conductos de sección circular o rectangular hacia puntos de desagüe. Este proceso se resuelve mediante el método de onda dinámica en el modelo de enrutamiento de flujo [36]. Para representar el drenaje dual (1D/2D), se implementó el enfoque de conexión directa [37], que permite vincular el flujo superficial (2D) con la red subterránea (1D) en los sectores donde existen conductos enterrados. Se emplearon tres tipos de mallas 2D para representar la superficie del terreno. En el canal Bogotá se utilizó una malla direccional con resolución de 3 m y un coeficiente de rugosidad ponderado para concreto y roca. En las zonas permeables se aplicó una malla hexagonal de 5 m con rugosidad representativa de la cobertura vegetal. Para las vías urbanas, donde ocurre la mayor parte del flujo superficial, se utilizó una malla de 2 m con coeficientes de rugosidad característicos del pavimento asfáltico y de concreto, mejorando así la precisión de las simulaciones hidráulicas.

Figura 2. Parámetros de entrada a PCSWMM.
Figure 2. Input parameters to PCSWMM.



La calibración del modelo se realizó mediante la herramienta SRTC (Calibración de Sintonización de Radio Basada en Sensibilidad) integrada en PCSWMM [36], la cual permite ajustar los parámetros del modelo con base en datos observados, evaluando la sensibilidad de distintos atributos, como lo detalla [38]. Esta herramienta requiere la estimación de rangos de incertidumbre para los parámetros calibrados, definidos como desviaciones porcentuales respecto a su valor inicial. Los valores adoptados para dicha incertidumbre se basaron en lo reportado por [39]. Los datos observados empleados en la calibración se obtuvieron mediante técnicas de visión artificial implementadas en Matlab. Este enfoque permite la adquisición e interpretación de imágenes provenientes de distintos dispositivos electrónicos, a partir de las cuales se extrae información específica, como distancias o dimensiones de objetos [40]. Diversas tecnologías basadas en imágenes y algoritmos computacionales han demostrado ser eficaces para evaluar profundidades del agua, calcular velocidades de flujo, caracterizar patrones hidráulicos e incluso estimar el transporte de sedimentos en ambientes fluviales [41], [42].

2.3. Criterio para la evaluación de la peligrosidad

La evaluación de la peligrosidad en peatones se realizó mediante la metodología propuesta por [11], quien adoptó los criterios obtenidos de experimentos con personas de diferentes edades y géneros, fusionando los nuevos datos con los publicados anteriormente por [23], con el fin de obtener más condiciones de inestabilidad, lo cual permitió definir la función límite inferior, valores mayores indican una alta peligrosidad, para conocer la estabilidad de un peatón en una vía inundada dependiendo de la profundidad del agua (y) y la velocidad del flujo (v), expresada en la ecuación (3).

$$(v * y) = 0.22 \frac{m^2}{s} \tag{3}$$

El nuevo conjunto de datos propuesto obtenidos en el modelo físico, fueron corroborados mediante un modelo numérico en CFD (Dinámica de fluidos computacional), estableciendo los límites de peligrosidad en peatones cuando se presentan inundaciones urbanas, a partir de tres niveles de peligrosidad (alta, media y baja), como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Niveles de peligrosidad para peatones.
Table 1. Pedestrian hazard levels.

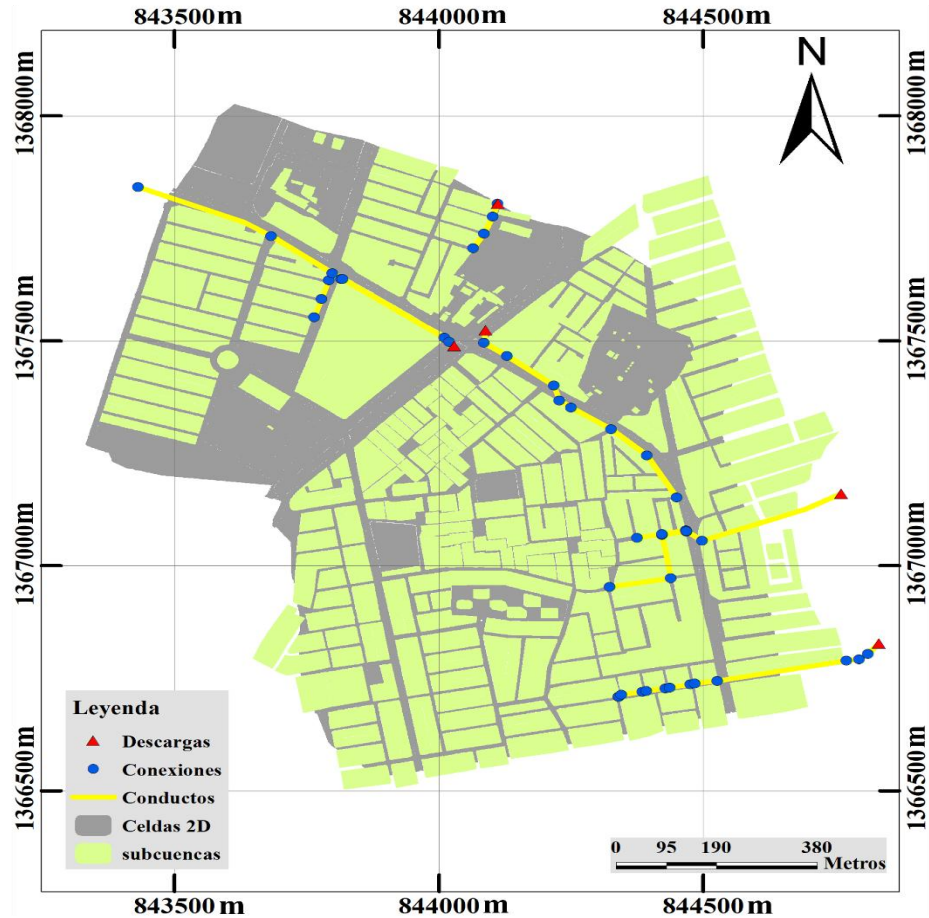
Nivel de peligrosidad	Criterio adoptado
Baja	$y \leq 0.5m - (v * y) \leq 0.16m^2/s$
Media	$y \leq 0.5m - 0.16m^2/s < (v * y) \leq 0.22m^2/s$
Alta	$y > 0.5m \text{ ó } (v * y) > 0.22m^2/s \text{ ó } v > 1.88m/s$

Donde la (y) representa la profundidad del agua, (v) la velocidad y (v * y) el producto de la velocidad por la profundidad. Con el criterio de peligrosidad definido, se extrae del modelo hidrodinámico la velocidad y la profundidad del agua obtenida para cada periodo de retorno en las vías (flujo 2D), analizándose en las principales vías del área de estudio.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo hidrodinámico bidimensional acoplado (1D/2D), implementado en PCSWMM, permitió simular de manera realista la interacción entre la red de drenaje pluvial existente y la escorrentía superficial generada en el área de estudio. El modelo unidimensional (1D) fue conformado por 44 conexiones, representando pozos de inspección y sumideros, y 39 conductos de distintos tipos (abiertos y cerrados), los cuales permiten transportar el flujo subterráneo hacia los puntos de descarga. Así mismo, se incorporaron 474 subcuencas para representar la generación de escorrentía producida por la precipitación de los diferentes periodos de retorno. El modelo bidimensional (2D) se estructuró con 97.705 celdas, 97.705 conexiones y un total de 13'443.976 conductos, lo que facilitó la simulación detallada del comportamiento del flujo superficial en calles, avenidas y zonas permeables del sector, como se muestra en la Figura 3. Esta configuración permitió analizar con mayor resolución espacial el desplazamiento del agua en superficie y su interacción con el sistema de drenaje, aspecto fundamental en la evaluación del peligro para peatones. El alto nivel de discretización alcanzado en el modelo 2D refuerza la capacidad de captura de detalles hidráulicos locales, lo cual resulta importante para identificar zonas críticas de acumulación y posibles fallos del sistema de drenaje en el caso de estudio.

Figura 3. Modelo Hidrodinámico del Caso de Estudio
Figure 3. Hydrodynamic Model of the Case Study



El proceso de calibración fue fundamental para ajustar el modelo hidrodinámico a las condiciones reales observadas en el caso de estudio. Para ello, se utilizó la herramienta de sintonización de radio (SRTC) en PCSWMM, optimizando parámetros sensibles como el ancho de las subcuencas, el coeficiente de impermeabilidad, el coeficiente de Manning y el número de curva. Se encontró que la mayor sensibilidad correspondía al ancho (W) y al número de curva (CN), cuyas incertidumbres se ajustaron en un 50 % y 19 %, respectivamente. El desempeño del modelo calibrado se evaluó mediante el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe ($NSE = 0.981$) y el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.998$), valores que según [43] indican un ajuste excelente. No obstante, se observó una ligera desviación en el pico del hidrograma simulado, con una diferencia de 5 mm (error relativo del 10 %), lo que sugiere que la inclusión de datos observados adicionales en distintos puntos del área de estudio podría mejorar aún más la confiabilidad del modelo.

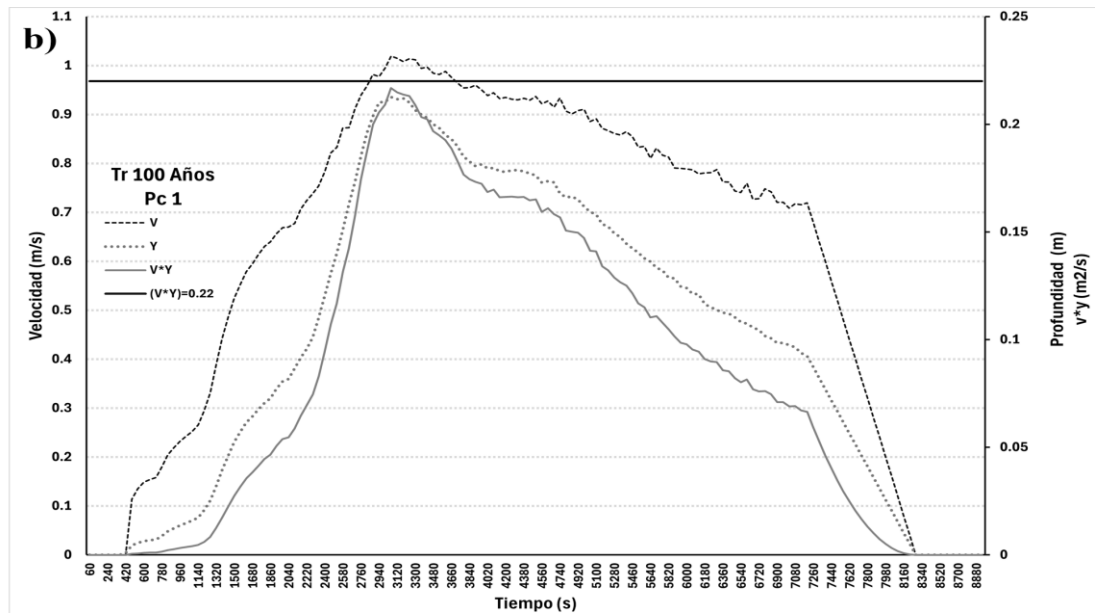
Una de las ventajas del modelo hidrodinámico es su capacidad para estimar, en cada instante de tiempo, las profundidades y velocidades del flujo en todas las celdas de cálculo, particularmente sobre las vías del caso de estudio. Esta característica permite analizar con detalle el comportamiento de las variables hidráulicas en cada tramo vial a lo largo del evento de lluvia, siendo esencial para realizar la evaluación espaciotemporal de la peligrosidad, como se muestra en la Figura 4, donde se representa la evolución temporal de la velocidad “ v ”, la profundidad “ y ” y el producto “ $v * y$ ” para el Punto Crítico 1 (Pc1), ubicado en la Avenida

Guaimaral, bajo eventos con períodos de retorno de 50 años (Figura 4a) y 100 años (Figura 4b). En ambos casos, los valores permanecen por debajo del umbral establecido para peligrosidad alta según el criterio adoptado (ver Tabla 1), lo que indica que no se alcanza un nivel de peligrosidad alta durante los eventos analizados. Para el escenario de 50 años, el valor máximo de $v * y$ es de aproximadamente $0.19 \text{ m}^2/\text{s}$, lo que corresponde a una condición de peligrosidad media durante el intervalo entre los 2100 y 5100 segundos. Este comportamiento también se refleja en la velocidad, que alcanza un valor máximo cercano a 1.0 m/s , y en la profundidad, que permanece por debajo de 0.5 m durante todo el evento, descartando la posibilidad de peligrosidad alta por criterio de profundidad. En el caso del período de retorno de 100 años, se observa un ligero incremento en ambas variables hidráulicas, alcanzando un valor máximo de $v * y$ de aproximadamente $0.21 \text{ m}^2/\text{s}$, sin sobrepasar el umbral de $0.22 \text{ m}^2/\text{s}$. Esto sugiere que el nivel de peligrosidad continúa en el rango medio, extendiéndose entre los 2000 y 5400 segundos.

Figura 4. Evolución de la Velocidad (v), Profundidad (y) y el Producto ($v*y$) en el tiempo para Pc1: a) $Tr = 50$ años y b) $Tr = 100$ años

Figure 4. Evolution of Velocity (v), Depth (y) and Product ($v*y$) over time for Pc1: a) $Tr = 50$ years and b) $Tr = 100$ years.

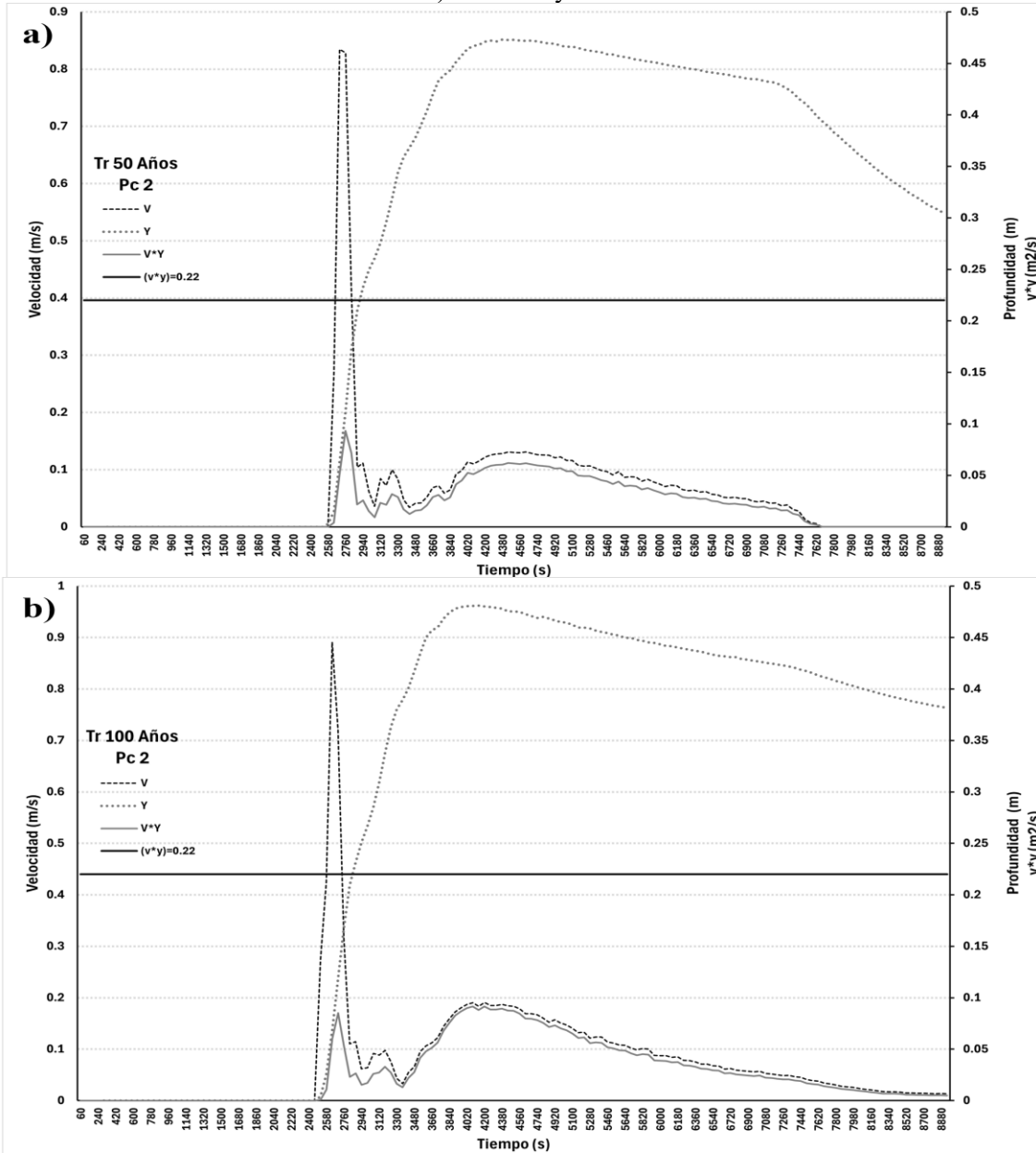




La Figura 5 presenta la evolución temporal de las variables hidráulicas para el Punto Crítico 2 (Pc2), localizado en la Avenida 12 Este. Durante el evento de 50 años (Figura 5a), el producto $v \cdot y$ se mantiene por debajo del umbral de peligrosidad alta (0.22 m²/s), alcanzando un valor máximo cercano a 0.10 m²/s, lo cual lo ubica dentro del rango de peligrosidad baja. Se observa un pico puntual de velocidad alrededor de los 2700 segundos, con un valor de 0.83 m/s; no obstante, esta condición es mínima y no coincide con un aumento significativo en la profundidad, por lo que no se alcanza una transición hacia niveles más altos de peligro. A partir de los 3000 segundos, la profundidad incrementa de forma sostenida, alcanzando un máximo de 0.46 m sin superar el umbral de 0.5 m, manteniéndose así en el rango de peligrosidad baja durante todo el evento. Para el escenario de 100 años (Figura 5b), el comportamiento es similar. Aunque la profundidad aumenta ligeramente hasta 0.48 m, el producto $v \cdot y$ continúa por debajo del umbral de 0.22 m²/s, alcanzando un máximo de 0.12 m²/s, clasificándose como peligrosidad baja. Se identifica un nuevo pico de velocidad cercano a 0.90 m/s, pero de forma transitoria y sin un incremento paralelo con la profundidad de flujo que justifique un cambio en la clasificación del peligro. Cabe destacar que Pc2 experimenta mayores niveles de acumulación de agua en comparación con Pc1 y Pc3. Esta condición se debe a la presencia de una pendiente mínima en el sector, lo que favorece la acumulación del flujo en la Avenida 12 Este. Adicionalmente, convergen múltiples calles que descargan sobre esta vía debido a su configuración topográfica, lo cual se refleja en las gráficas de profundidad que no bajan a valores cercanos a cero tras el final del evento, evidenciando la acumulación del flujo en la vía posterior al evento de lluvia.

Figura 5. Evolución de la Velocidad (v), Profundidad (y) y el Producto ($v \cdot y$) en el tiempo para Pc2: a) $Tr = 50$ años y b) $Tr = 100$ años

Figure 5. Evolution of Velocity (v), Depth (y) and Product ($v \cdot y$) over time for Pc2: a) $Tr = 50$ years and b) $Tr = 100$ years.



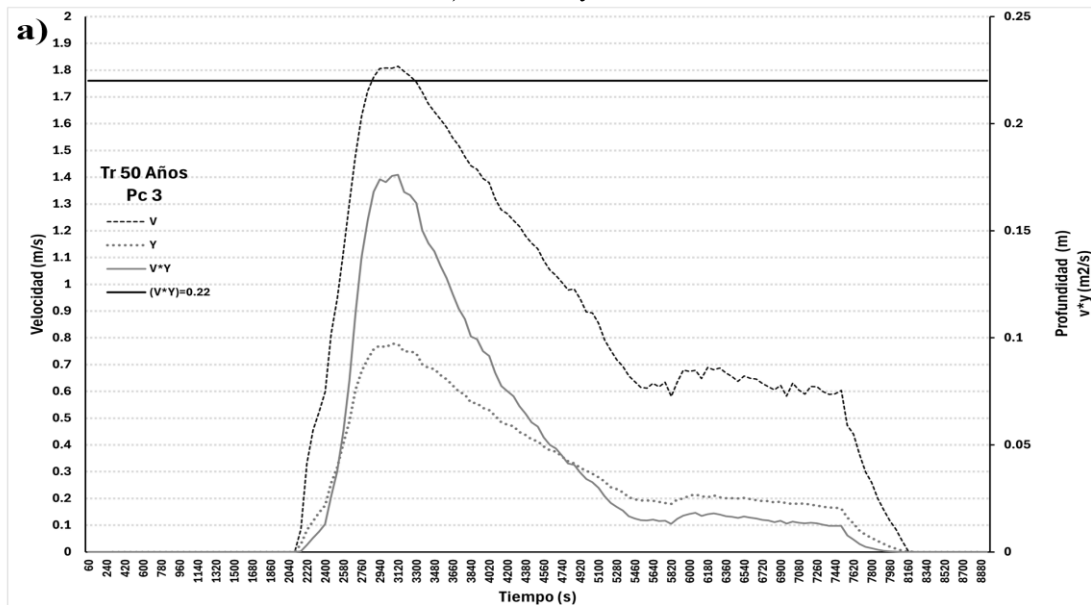
La Figura 6 muestra la evolución temporal de las variables hidráulicas para el Punto Crítico 3 (Pc3), ubicado en la Avenida Libertadores. En el escenario con periodo de retorno de 50 años (Figura 6a), se observa un incremento de la velocidad que alcanza un valor máximo de 1.806 m/s entre los 2940 s y 3180 s, superando el umbral de 1.88 m/s definido para peligrosidad alta. Aunque el producto $v \cdot y$ no supera los 0.22 m²/s (con un valor máximo cercano a 0.17 m²/s), el criterio de peligrosidad alta se alcanza únicamente por el valor de la velocidad, sin necesidad de que coincidan los otros umbrales. A partir de los 3180 s, la peligrosidad desciende a un nivel medio y finalmente vuelve a clasificarse como baja al finalizar el evento (3360 s). En

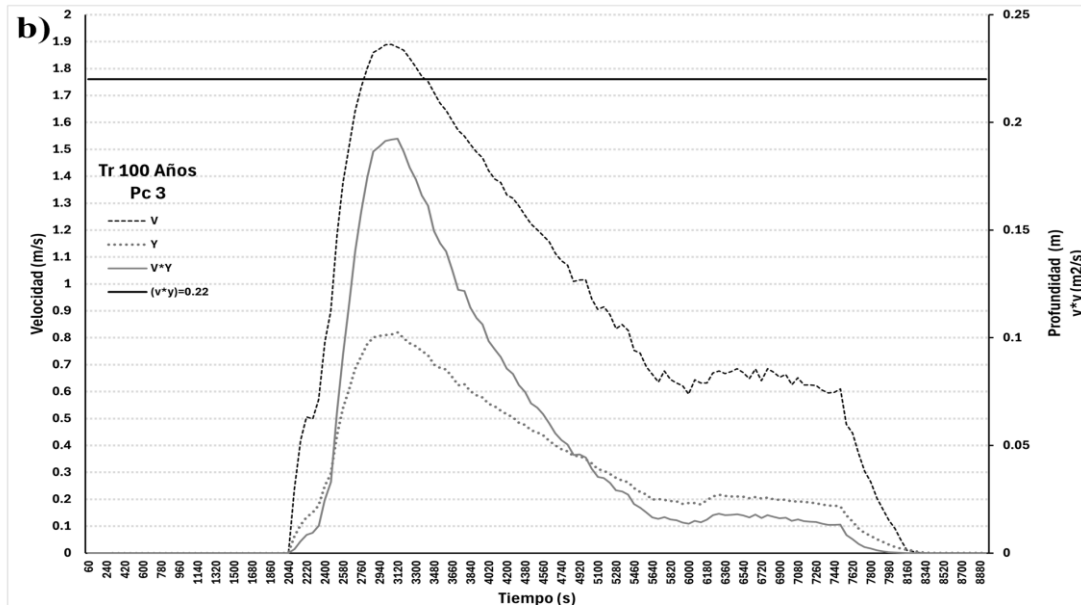
cuanto a la profundidad, se mantiene por debajo del umbral de 0.5 m durante todo el evento, con un valor máximo de 0.10 m, por lo que no se alcanza el criterio de peligrosidad alta por profundidad. En el evento de 100 años (Figura 6b), se repite el patrón anterior con mayor intensidad. La peligrosidad alta se presenta entre los 2820 s y 3300 s, cuando la velocidad alcanza 1.89 m/s, superando nuevamente el umbral definido para dicho nivel de peligro. El producto $v * y$ permanece por debajo de 0.22 m²/s, con un valor máximo de 0.19 m²/s, lo cual reafirma que la clasificación como del nivel alto se debe exclusivamente a la velocidad. Posteriormente, entre los 3300 s y 3420 s, la peligrosidad desciende a nivel medio, retornando finalmente a condiciones de bajo peligro. La profundidad de flujo se mantiene por debajo del umbral, alcanzando un máximo de 0.11 m durante el pico del evento.

El comportamiento observado en Pc3 responde a las condiciones topográficas locales. En el cruce de la Avenida Libertadores, se presenta una depresión que genera una mayor pendiente, lo que favorece el incremento significativo de la velocidad del flujo superficial. Esta morfología, común en intersecciones urbanas con desniveles marcados, explica las altas velocidades observadas, mientras que las profundidades bajas son consistentes con zonas de escasa acumulación, pero fuerte aceleración del flujo. Estos resultados confirman que, aun sin grandes volúmenes acumulados, la velocidad del agua puede representar un peligro considerable para los peatones, lo cual debe ser considerado en la planificación de medidas de mitigación urbana. Finalmente, la evaluación espaciotemporal de la peligrosidad evidencia comportamientos diferentes entre los puntos críticos analizados para las distintas avenidas. El Pc2 muestra condiciones hidrodinámicas favorables para el tránsito peatonal incluso bajo eventos extremos (100 años), mientras que el Pc3 presenta condiciones peligrosas en ambos escenarios, con velocidades del flujo que comprometen la estabilidad de los peatones, y el Pc1 se sitúa en un punto intermedio, con peligrosidad media que debe ser considerada para medidas preventivas por los tomadores decisiones de la ciudad.

Figura 6. Evolución de la Velocidad (v), Profundidad (y) y el Producto (v*y) en el tiempo para Pc3: a) Tr =50 años y b) Tr = 100 años

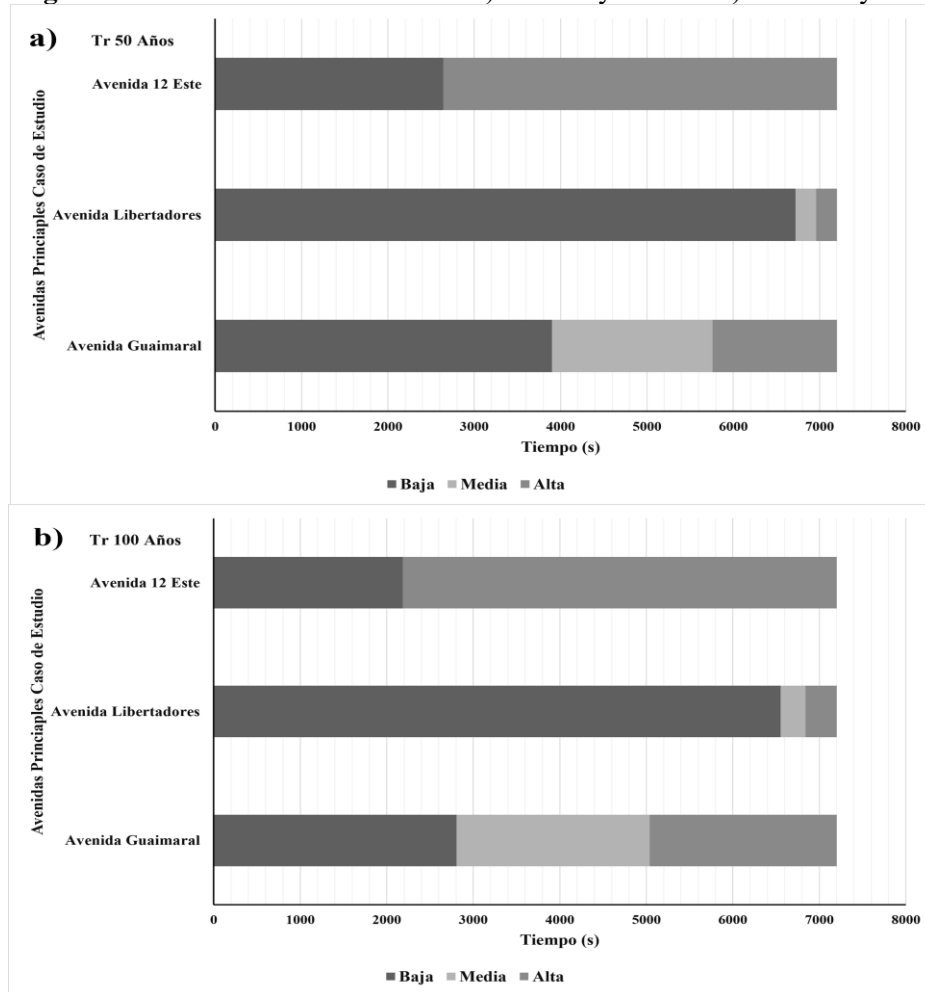
Figure 6. Evolution of Velocity (v), Depth (y) and Product (v*y) over time for Pc3: a) Tr = 50 years and b) Tr = 100 years.





La Figura 7 presenta la duración, en segundos, de los distintos niveles de peligrosidad observados en las tres vías principales analizadas para los eventos de lluvia con períodos de retorno de 50 y 100 años. Este análisis evidencia cómo la peligrosidad varía tanto en el tiempo como en el espacio, dependiendo de la ubicación y de la intensidad del evento. En el escenario de 50 años (Figura 7a), la Avenida Libertadores muestra una mayor estabilidad hidrodinámica, con una prolongada duración bajo condiciones de peligrosidad baja (aproximadamente 6700 s), y solo episodios puntuales y mínimos de peligrosidad media y alta hacia el final del evento. Sin embargo, la Avenida Guaimaral presenta un comportamiento más complejo, caracterizado por una transición gradual desde niveles bajos hacia peligrosidad media y, finalmente, alta, alcanzando aproximadamente 1400 segundos en condiciones críticas. Esta tendencia se intensifica en el escenario de 100 años (Figura 7b), donde la duración de la peligrosidad alta en esta vía se extiende hasta 2200 segundos, representando un peligro significativo para las personas que transitan por esta zona. La Avenida 12 Este, por su parte, presenta un comportamiento particular, ya que alterna únicamente entre niveles de peligrosidad baja y alta, sin registrar estados intermedios (peligrosidad media) en ninguno de los escenarios evaluados. Esto sugiere que ciertas vías urbanas actúan como zonas de acumulación y concentración de escorrentía superficial, especialmente en sectores con pendiente baja y convergencia de calles, lo cual incrementa la profundidad del agua y, por ende, el peligro para vehículos, peatones y edificaciones cercanas.

Figura 7. Duración de la Peligrosidad en segundos: a) Tr =50 años y b) Tr = 100 años
Figure 7. Hazard duration in seconds: a) Tr = 50 years and b) Tr = 100 years.

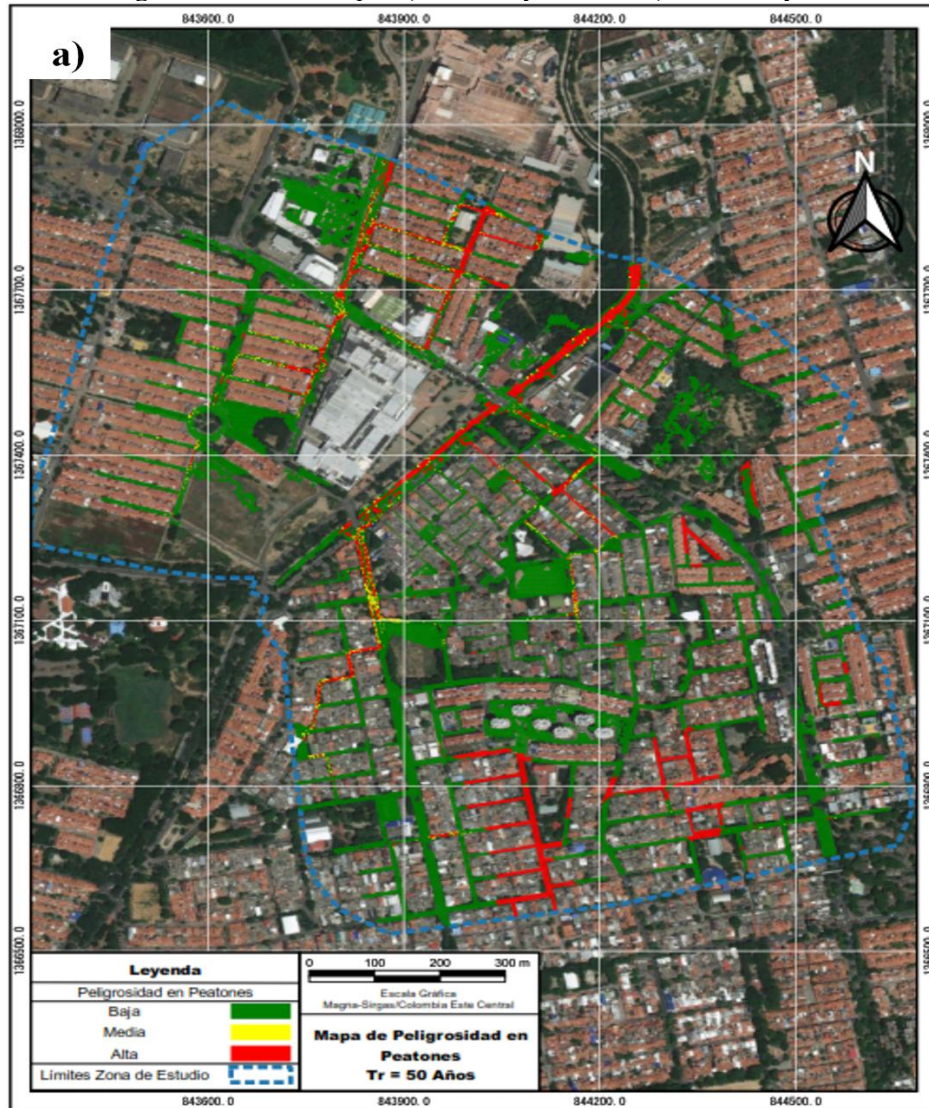


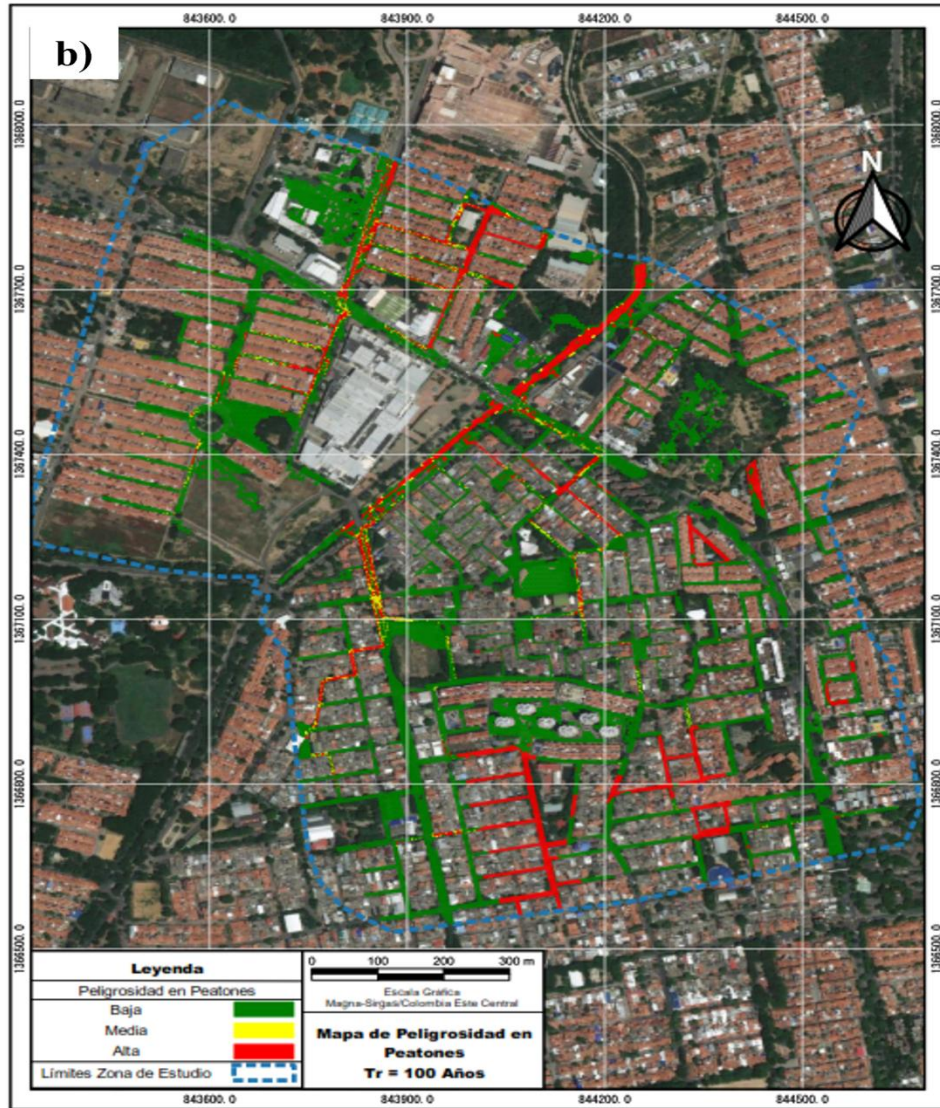
La identificación de estas duraciones críticas resulta fundamental para la priorización de intervenciones en zonas peatonales, diseño de pasos seguros, y establecimiento de alertas tempranas en escenarios de precipitación intensa. Además, se evidencia que la duración del peligro no es homogénea espacialmente ni temporalmente, lo que subraya la necesidad de una evaluación diferenciada por cada vía. Por lo tanto, es importante en términos de gestión del peligro para los tomadores de decisiones, las avenidas con mayor duración en peligrosidad alta, como la Avenida Guaimaral, deben considerarse prioritarias para implementar medidas de mitigación, especialmente en escenarios futuros de cambio climático que podrían intensificar la frecuencia de estos eventos.

La Figura 8 muestra los mapas de peligrosidad para los eventos de lluvia con períodos de retorno de 50 y 100 años (Figura 8ª y 8b respectivamente), evidenciando espacialmente los sectores con condiciones de peligro. En ambos escenarios, se identifican zonas con niveles de peligrosidad baja, media y alta, destacando la Avenida Guaimaral, donde el producto $v * y$ supera el umbral de $0.16 \text{ m}^2/\text{s}$, alcanzando valores de hasta $0.21 \text{ m}^2/\text{s}$, lo que la clasifica como zona de peligrosidad media, muy cercana al límite superior. En el caso de la Avenida Libertadores, se observan tramos con velocidades máximas que superan los 1.8 m/s , así como sectores en la Avenida 12E, donde la profundidad del flujo sobrepasa los 0.5 m , lo que genera una peligrosidad alta según la metodología adoptada. Los mapas permitieron visualizar de forma detallada la distribución espacial de los niveles de peligro. Para el evento de 50 años, las áreas clasificadas como de

peligrosidad baja representan el 81.9 % del total, mientras que las de peligrosidad media y alta corresponden al 2.7 % y 15.4 %, respectivamente. En el escenario de 100 años, las zonas de peligrosidad baja disminuyen ligeramente al 80.4 %, mientras que la peligrosidad media aumenta al 3.0 % y la alta al 16.7 %. Estos resultados muestran un incremento claro de las áreas críticas a medida que las precipitaciones se intensifican, lo cual es relevante para escenarios futuros del clima.

Figura 8. Mapas de la Peligrosidad: a) Tr = 50 años y b) Tr = 100 años
Figure 8. Hazard maps: a) Tr = 50 years and b) Tr = 100 years





5. CONCLUSIONES

Este estudio desarrolló una evaluación espaciotemporal de la peligrosidad en peatones por inundaciones urbanas, integrando un modelo hidrodinámico de drenaje dual en el software PCSWMM con criterios de inestabilidad humana. El enfoque permitió no solo representar con mayor resolución el comportamiento dinámico del flujo superficial en una cuenca urbana de Cúcuta (Colombia), sino también analizar cómo evolucionan en el espacio y en el tiempo las condiciones de peligro para peatones en función de variables hidráulicas clave como la velocidad, la profundidad y el producto entre las dos.

Los resultados muestran que el modelo hidrodinámico calibrado proporciona una simulación coherente con el sistema de drenaje existente y su interacción con el flujo superficial, validando su utilidad para el análisis de peligro a escala urbana. Se evidenció que, la peligrosidad no se comporta de forma homogénea ni estacionaria: se identificaron sectores con condiciones críticas que varían a lo largo del evento de lluvia, dependiendo del periodo de retorno, la morfología del terreno y la configuración de las vías. En particular, la Avenida Guaimaral mostró una peligrosidad media o en algunos segmentos alta, la Avenida 12 Este presentó acumulación de flujo con bajo niveles de peligro, y la Avenida Libertadores mostró condiciones

de peligrosidad alta inducidas por velocidades que superaron el umbral, a pesar de presentar profundidades moderadas. Esto resalta que la velocidad puede constituirse en el principal detonante de peligro en corredores con alta pendiente o depresión topográfica.

La generación de mapas espaciotemporales de peligrosidad, así como la evaluación de su duración y evolución, aportan información importante para la gestión urbana del peligro, superando las limitaciones de los enfoques tradicionales que se basan únicamente en mapas estáticos. Esta aproximación ofrece un marco metodológico replicable para otras ciudades de Colombia que enfrentan situaciones similares, y permite a los tomadores de decisiones identificar sectores prioritarios para intervenciones estructurales y no estructurales orientadas a la seguridad peatonal.

Se destaca la utilidad del enfoque hidrodinámico como herramienta clave para la toma de decisiones informadas en el contexto de planificación urbana resiliente para las ciudades, ya que a nivel mundial los eventos de inundación y el peligro asociado en cuencas urbanas es un tema que cada día es más preocupante, las inundaciones en el mundo y las precipitaciones asociadas al cambio climático han aumentado en más de un 50% en los últimos 10 años, y se espera que los niveles de peligrosidad en peatones aumenten significativamente en un futuro. Por lo tanto, 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.

6. REFERENCIAS

- [1] H. Valencia-Perez, M. Vanegas-Chamorro y R. Ramírez-Restrepo, “Tendencia global en las investigaciones relacionadas con el rendimiento energético por la implementación de techos verdes en edificaciones: Importancia de su desarrollo en la costa Caribe colombiana.”, *Prospectiva*, vol. 20, n.º 1, pp. 1-15 ,2022. doi.org/10.15665/rp.v20i1.2499
- [2] M. C. Cunha, J. A. Zeferino, N. E. Simões, G. L. Santos y J. G. Saldarriaga, "Decision support model for the optimal siting and sizing of storage units in stormwater drainage systems", *International Journal of Sustainable Development and Planning*, vol. 122-132, n.º 12(1), 2017. Disponible: <http://www.witpress.com/journals>
- [3] UNESCO, UN-Water, “United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change”, Paris, 2020. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985.locale=en>
- [4] M.T. Gómez Vargas, "Estudio del Impacto del cambio climático en los caudales de entrada al embalse del Río Frío", *INGE CUC*, vol. 12, no. 1, pp 43-50, 2016. doi.org/10.17981/ingecuc.12.1.2016.04.
- [5] Á. López Ramos, L. Martínez Acosta, J. J. Feria Díaz y J. E. Cruz Benedetti, “Planificación del recurso hídrico en la quebrada Aguas Blancas, zona rural de Montería, Córdoba”, *Prospectiva*, vol. 14, n. 2, pp. 71–80, 2016. doi.org/10.15665/rp.v14i2.567.
- [6] E. D. Cubides y G. E. Santos. “Control de escorrentías urbanas mediante sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS): Pozos/Zanjas de infiltración”, *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 12, no. 24, pp. 32-42, 2017. doi.org/10.31908/19098367.3813.
- [7] R. A. Castro Padilla, C. E. Jiménez Peñaranda, E. E. Rojas Martínez, D. C. Manco Jaraba y F. D. Lascarro Navarro, “Amenaza y vulnerabilidad por inundación del Brazo de Mompóx (Río Magdalena), corregimiento de Cantera, Bolívar, Colombia”, *Prospectiva*, vol. 19, n. 2, pp. 1–11, 2021. doi.org/10.15665/rp.v19i2.2712.

- [8] G. Musolino, R. Ahmadian y R. A. Falconer. "Comparison of flood hazard assessment criteria for pedestrians with a refined mechanics-based method", *Journal of Hydrology*, vol. 9, no. 100067, pp. 1-13, 2020. doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.100067.
- [9] C. Arrighi, M. Pregnotato, R.J. Dawson, F. Castelli "Preparedness against mobility disruption by floods" *Sci. Total Environ.*, 654, pp. 1010-1022, 2019. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.191.
- [10] D. Rey-Valencia y J. Zambrano, "Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palgrande", *Uis ingenierías*, vol. 17, n. 1, pp. 115–126, 2018. doi.org/10.18273/revuin.v17n1-201801.
- [11] E. Martínez Gomariz, "Inundaciones urbanas: Criterios de peligrosidad y evaluación del riesgo para peatones y vehículos", *Disertación Ph.D*, Dept. Ing. Civil y Ambiental, Univ. Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2016. <http://hdl.handle.net/2117/106280>.
- [12] X. Wang, G. Kinsland, D. Poudel y A. Fenech. "Urban flood prediction under heavy precipitation", *J. Hydrol.*, vol. 577, no. 123984, pp. 1-21, 2019. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123984
- [13] Naves, J. Anta, J. Puertas, M. Regueiro-Picallo y J. Suárez, "Using a 2D shallow water model to assess Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) and Structure from Motion (SfM) techniques in a street-scale urban drainage physical model", *J. Hydrol.*, vol. 575, pp. 54–65, 2019. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.003
- [14] V. Bellos, I. M. Kourtis, A. Moreno-Rodenas y V. A. Tsihrintzis, "Quantifying Roughness Coefficient Uncertainty in Urban Flooding Simulations through a Simplified Methodology", *Water*, vol. 9, no. 944, pp. 1–12, 2017. doi.org/10.3390/w9120944
- [15] B. Dong, J. Xia, M. Zhou, Q. Li, R. Ahmadian y R. A. Falconer, "Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles", *Sci. Total Environ.*, vol. 827, pp. 1-13, 2022. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154098
- [16] M. Oberauer y B. Lehmann, "Enhanced 2D-models as alternative to dual-drainage systems for urban flood simulation", *J. Hydrol.*, vol. 645, n.º 2, pp. 1–10, 2024. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132198
- [17] J. Xia, R. A. Falconer, B. Lin y G. Tan, "Numerical assessment of flood hazard risk to people and vehicles in flash floods", *Environmental Modelling & Softw.*, vol. 26, n. 8, pp. 987–998, 2011. doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.017
- [18] C. Arrighi, H. Oumeraci y F. Castelli, "Hydrodynamics of pedestrians' instability in floodwaters", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 21, pp. 515–531, 2017. doi.org/10.5194/hess-21-515-2017
- [19] S. Jonkman y E. Penning-Rowsell, "Human instability in flood flows", *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 45, n. 5, pp. 1208–1218, 2008. doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x
- [20] Federal Emergency Management Agency (FEMA), *The Floodway: A Guide for Community Permit Officials*. Washington D. C, 1979.
- [21] D. Ramsbottom et al., "Flood Risk to People: Phase 2. R&D Technical Report FD", *Dept. Environ., Food Rural Affairs (DEFRA), UK Environ. Agency*, 2006. doi.org/10.13140/RG.2.1.4663.6246.
- [22] B. Russo, "Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding of urban areas", *Disertación Ph.D*, Dept. Ing. Civil y Ambiental, Univ. Politécnica de Catalunya, Barcelona. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=258828>

- [23] J. Xia, R. A. Falconer, Y. Wang y X. Xiao, "New criterion for the stability of a human body in floodwaters", *J. Hydraulic Res.*, vol. 52, n. 1, pp. 93–104, 2014. doi.org/10.1080/00221686.2013.875073
- [24] E. Martínez-Gomariz, M. Gómez y B. Russo, "Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding", *Nat. Hazards*, vol. 82, n. 2, pp. 1259–1278, 2016. doi.org/10.1007/s11069-016-2242-z
- [25] Q. Chen, J. Xia, R. A. Falconer y P. Guo, "Further improvement in a criterion for human stability in floodwaters", *J. Flood Risk Manage.*, vol. 12, n. 3, pp. 1–9, 2019. 10.1111/jfr3.12486
- [26] B. Dong, J. Xia, M. Zhou, Q. Li, R. Ahmadian y R. A. Falconer, "Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles", *Sci. Total Environ.*, vol. 857, n. 25, p. 154098, 2022. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154098
- [27] J. Xia, R. A. Falconer, B. Lin y G. Tan, "Numerical assessment of flood hazard risk to people and vehicles in flash floods", *Environmental Modelling & Softw.*, vol. 26, pp. 987–998, 2011. 10.1016/j.envsoft.2011.02.017
- [28] G. Corzo Perez, D. I. Sanchez Tapiero, M. A. Contreras y C. Zevenbergen, "Development of a hazard risk map for assessing pedestrian risk in urban flash floods: A case study in Cúcuta, Colombia", *River*, pp. 1–16, 2024. doi.org/10.1002/rvr2.78
- [29] D. I. Sanchez-Tapiero, C. A. Bonilla-Granados, y J. D. Ramón-Valencia, "Construcción de un modelo hidrológico e hidráulico (1D/2D) para el análisis de inundaciones urbanas en Cúcuta, Colombia", *Respuestas*, vol. 29, n. 3, pp. 15-30, sep. 2024. doi.org/10.22463/0122820X.4710.
- [30] S. F. Rodríguez-Corzo, "Simulación dinámica de inundaciones asumiendo un estado crítico de máxima escorrentía, bajo cinco periodos de retorno, en la Quebrada La Virgen del municipio de San José de Miranda-Santander", *Uis Ingenierías*, vol. 17, n. 1, pp. 251–270, 2017. doi.org/10.18273/revuin.v17n12018025
- [31] M. Bernard, "Formulas for rainfall intensities of long durations. trans", *ASCE*, vol. 96, pp. 592–624. doi.org/10.1061/TACEAT.0004323
- [32] A. Nájera-Ramos, "Propuesta Metodológica Para La Generación De Ortofotos Y Modelos Digitales De Elevación De Alta Resolución A Través De Vuelos Con Drones No-Fotogramétricos", *Tesis M.S*, Fac. Ingeniería, Univ. Autónoma de Guerrero, 2021. http://ri.uagro.mx/bitstream/handle/uagro/2498/TE_851102_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [33] Agisoft LLC Agisoft Metashape User Manual Professional Edition. (s.f.). Agisoft. <https://www.agisoft.com/>
- [34] Rossman, L. A., & Simon, M. A. (2007). Stormwater Management Model User's Manual Version 5.2. Environmental Research Agency. <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-04/swmm-users-manual-version-5.2.pdf>
- [35] L. Mohd Sidek, L. H. C. Chua, A. S. M. Azizi, H. Basri, A. S. Jaafar y W. C. Moon, "Application of PCSWMM for the 1-D and 1-D–2-D modeling of urban flooding in damansara catchment, malaysia", *Applied Sciences*, vol. 11, n. 9300, 2021. doi.org/10.3390/app11199300
- [36] CHI. PCSWMM Manual. Guelph, Canadá, Computational Hydraulics International, 2018
- [37] J. A. Rojas, "Análisis de incertidumbre y esquemas de calibración de un modelo conceptual de drenaje urbano en un ambiente de escasez de recursos", Tesis M.S, Dep. Ing. Civil y Ambiental, Fac. Ing., Univ. de los Andes, Bogotá, 2011. <http://hdl.handle.net/1992/11559>

- [38] E. Castro, A. Caetano, J. J, da Silva, J. R. Gonçalves, “Evaluation of hydrological parameters of the Goiana River basin in the State of Pernambuco using the automatic calibration tool of the hydrodynamic model PCSWMM in multiple fluviometric stations”, *Research, Society and Development*, Vol 12, n. 2, pp. 1-24, 2022. doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25331.
- [39] W. James. (2005). Rules for responsible modeling. (4nd ed.). https://www.chiwater.com/Files/R184_CHI_Rules.pdf
- [40] J.M.G.P. Isidoro, R. Martins, R. F. Carvalho, J. L. M. P. de Lima, “A high-frequency low-cost technique for measuring small-scale water level fluctuations using computer vision”, *Measurement*, vol. 180, pp. 1-12, 2021. doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109477.
- [41] M. N. A. Beg, R. F. Carvalho, S. Tai, W. Brevis, M. Rubinato, A. Schellart, J. Leandro, “A comparative study of manhole hydraulics using stereoscopic PIV and different RANS models”, *Water Sci Technol*, vol. 1, pp. 97-98, 2017. doi.org/10.2166/wst.2018.089
- [42] D. I. Sanchez-Tapiero, C. A. Peña-Cortés, y J. D. Ramón-Valencia, “Herramienta de apoyo para la calibración de modelos numéricos de sistemas de drenaje en ambientes urbanos empleando procesamiento digital de imágenes.”, *Respuestas*, vol. 28, n. 1, pp. 46-58, ene. 2023. doi.org/10.22463/0122820X.4417
- [43] J. A. Rojas, “Análisis de incertidumbre y esquemas de calibración de un modelo conceptual de drenaje urbano en un ambiente de escasez de recursos”, *Tesis M.S*, Dep. Ing. Civil y Ambiental, Fac. Ing., Univ. de los Andes, Bogotá, 2011. <http://hdl.handle.net/1992/11559>

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Pamplona por el financiamiento mediante la Convocatoria Interna del Banco de Proyectos que derivó el presente trabajo de investigación.