

Modelo Hidrodinámico 1D/2D Para El Análisis De Inundaciones Urbanas En Una Subcuenca  
De La Zona Nororiental De La Ciudad De Cúcuta, Norte De Santander

Daniel Elvith Franco Benavides

Director

Diego Ivan Sanchez Tapiero

Ingeniero Civil MSc.

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

2024

Modelo Hidrodinámico 1D/2D Para El Análisis De Inundaciones Urbanas En Una Subcuenca  
De La Zona Nororiental De La Ciudad De Cúcuta, Norte De Santander

Daniel Elvith Franco Benavides

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Diego Ivan Sanchez Tapiero

Ingeniero Civil MSc.

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

2024

## **Agradecimientos**

A Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. A mis padres, Rocío y Gilmer, por ser mi pilar más firme, su amor, sacrificio y dedicación han sido el motor que me impulsó a superar cada desafío. A mis hermanos Kelly y Andrés, y a mis mejores amigos, Dana y Daniel, gracias por su apoyo constante, su cariño y sus palabras de ánimo que siempre me recordaron la importancia de la unión y la amistad sincera.

A mi tutor y amigo el profe Diego, mi más profundo agradecimiento por confiar en mí, guiarme con paciencia y compartir conmigo sus conocimientos y experiencias. Su apoyo ha sido invaluable durante este proceso, y sus enseñanzas quedarán como un legado significativo en mi vida profesional y personal.

A mis grandes amigos que me regaló el programa de Ingeniería Civil, quienes hicieron de este camino una experiencia inolvidable. A Sebas, Cesar, Kevin, Jhorman, Gabo, Diego, y Mag, gracias por su amistad, por cada momento compartido y por ser un soporte constante en este viaje.

A los docentes del programa de Ingeniería Civil, quienes con su dedicación y compromiso me brindaron las herramientas necesarias para alcanzar esta meta. Gracias por transmitir su conocimiento con pasión y por formar en mí un profesional que busca siempre la excelencia.

Finalmente, al programa de Ingeniería Civil y a la Universidad de Pamplona, gracias por ofrecerme un entorno académico enriquecedor y lleno de oportunidades.

## Tabla de Contenido

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>AGRADECIMIENTOS.....</b>                               | <b>3</b>  |
| <b>TABLA DE CONTENIDO .....</b>                           | <b>4</b>  |
| <b>RESUMEN .....</b>                                      | <b>11</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                     | <b>12</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                 | <b>13</b> |
| <b>DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....</b>                     | <b>15</b> |
| Planteamiento del Problema .....                          | 15        |
| <b>Justificación.....</b>                                 | <b>16</b> |
| <b>OBJETIVOS .....</b>                                    | <b>17</b> |
| Objetivo General.....                                     | 17        |
| Objetivos Específicos .....                               | 18        |
| <b>MARCO REFERENCIAL.....</b>                             | <b>18</b> |
| Marco de antecedentes o estado del arte.....              | 18        |
| Marco teórico.....                                        | 25        |
| Inundaciones Urbanas y su Gestión.....                    | 25        |
| Modelos Hidrodinámicos en la Gestión de Inundaciones..... | 26        |
| Drenaje Urbano: Red Menor y Red Mayor.....                | 26        |
| Modelos de Drenaje Dual. ....                             | 26        |
| InfoWorks ICM.....                                        | 27        |
| Ecuaciones Utilizadas en InfoWorks ICM .....              | 28        |
| Criterios de Peligrosidad en Inundaciones Urbanas .....   | 31        |
| Marco Legal.....                                          | 32        |

|                                                                                                 |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS).....                   | 32        |
| Constitución Política de Colombia. ....                                                         | 32        |
| Ley 99 de 1993.....                                                                             | 32        |
| Ley 1523 de 2012.....                                                                           | 32        |
| Decreto 1076 de 2015. ....                                                                      | 32        |
| Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC). ....                                   | 32        |
| Plan de Ordenamiento Territorial (POT). ....                                                    | 32        |
| Marco Contextual .....                                                                          | 32        |
| Ubicación y Generalidades. ....                                                                 | 32        |
| Extensión y Límites. ....                                                                       | 33        |
| Demografía. ....                                                                                | 34        |
| Cultura.....                                                                                    | 34        |
| Infraestructura y Desafíos Urbanos. ....                                                        | 34        |
| <b>METODOLOGÍA.....</b>                                                                         | <b>35</b> |
| 1° Fase Identificación y procesamiento de la información de la zona de estudio .....            | 35        |
| Usos del suelo .....                                                                            | 36        |
| Topografía de la zona.....                                                                      | 36        |
| Red de alcantarillado.....                                                                      | 38        |
| Datos de precipitación.....                                                                     | 38        |
| Procesamiento de la información.....                                                            | 40        |
| 2° Fase Obtención del hietograma de precipitación de diseño .....                               | 43        |
| Organización de los Datos Pluviométricos. ....                                                  | 43        |
| Desarrollo de las Curvas IDF utilizando la Distribución de Gumbel. ....                         | 44        |
| Construcción de los Hietogramas de Precipitación utilizando el Método de Bloques Alternos ..... | 45        |
| Cálculo del Tiempo de Concentración de la Cuenca (Ecuación de California) .....                 | 45        |
| 3° Fase Construcción del modelo numérico de la zona de estudio .....                            | 46        |
| Creación del Espacio de Trabajo .....                                                           | 47        |
| Configuración de la Red de Modelo .....                                                         | 48        |

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| Simulación del Modelo y Criterios de Calibración.....                 | 50        |
| Proceso de Calibración .....                                          | 50        |
| 4° Fase Análisis del modelo hidrodinámico del sistema de drenaje..... | 52        |
| Simulación de Escenarios Hidrodinámicos .....                         | 52        |
| Evaluación de la Zona Superficial (2D).....                           | 53        |
| Evaluación de la Red Subterránea (1D).....                            | 53        |
| Interacción entre Sistemas 1D y 2D.....                               | 53        |
| <b>RESULTADOS .....</b>                                               | <b>54</b> |
| 1° Fase .....                                                         | 54        |
| Delimitación de la Zona 2D de Estudio .....                           | 54        |
| 2. Red de Alcantarillado (Modelo 1D) .....                            | 56        |
| 3. Usos del Suelo.....                                                | 57        |
| 4. Modelo Digital de Elevación (DEM).....                             | 59        |
| 5. Datos de Precipitación de la Estación Meteorológica.....           | 61        |
| 2° Fase .....                                                         | 62        |
| 1. Curvas IDF .....                                                   | 62        |
| 2. Cálculo del Tiempo de Concentración de la Cuenca .....             | 63        |
| 3. Hietogramas de Precipitación por Tiempo de Retorno .....           | 64        |
| 3° Fase .....                                                         | 66        |
| Zona Superficial (2D) .....                                           | 66        |
| Red Subterránea (1D) .....                                            | 71        |
| Evento de Lluvia de Calibración.....                                  | 72        |
| Calibración del Modelo.....                                           | 72        |
| Modelo Hidrodinámico .....                                            | 75        |
| 4° Fase .....                                                         | 75        |
| Profundidad Promedio y Máxima por Tiempo de Retorno .....             | 75        |
| Velocidades del Flujo para Tiempos de Retorno de 10 y 25 Años.....    | 79        |
| Velocidades del Flujo para Tiempos de Retorno de 50 y 100 Años.....   | 83        |
| Capacidad Hidráulica de la Red.....                                   | 86        |
| Evaluación del Peligro de Inundaciones Urbanas.....                   | 90        |

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| <b>CONCLUSIONES .....</b>    | <b>93</b> |
| <b>RECOMENDACIONES .....</b> | <b>95</b> |
| <b>REFERENCIAS.....</b>      | <b>96</b> |

## Lista de Tablas

|                      |    |
|----------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> .... | 32 |
| <b>Tabla 2.</b> .... | 40 |
| <b>Tabla 3.</b> .... | 51 |
| <b>Tabla 4.</b> .... | 61 |
| <b>Tabla 5.</b> .... | 62 |
| <b>Tabla 6.</b> .... | 74 |
| <b>Tabla 7.</b> .... | 92 |

## Lista de Figuras

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| <b>Figura 1.....</b>  | <b>37</b> |
| <b>Figura 2.....</b>  | <b>39</b> |
| <b>Figura 3.....</b>  | <b>41</b> |
| <b>Figura 4.....</b>  | <b>42</b> |
| <b>Figura 5.....</b>  | <b>48</b> |
| <b>Figura 6.....</b>  | <b>55</b> |
| <b>Figura 7.....</b>  | <b>57</b> |
| <b>Figura 8.....</b>  | <b>59</b> |
| <b>Figura 9.....</b>  | <b>60</b> |
| <b>Figura 10.....</b> | <b>63</b> |
| <b>Figura 11.....</b> | <b>65</b> |
| <b>Figura 12.....</b> | <b>65</b> |
| <b>Figura 13.....</b> | <b>66</b> |
| <b>Figura 14.....</b> | <b>67</b> |
| <b>Figura 15.....</b> | <b>68</b> |
| <b>Figura 16.....</b> | <b>69</b> |
| <b>Figura 17.....</b> | <b>70</b> |

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| <b>Figura 18.....</b> | <b>71</b> |
| <b>Figura 19.....</b> | <b>72</b> |
| <b>Figura 20.....</b> | <b>73</b> |
| <b>Figura 21.....</b> | <b>75</b> |
| <b>Figura 22.....</b> | <b>76</b> |
| <b>Figura 23.....</b> | <b>77</b> |
| <b>Figura 24.....</b> | <b>78</b> |
| <b>Figura 25.....</b> | <b>79</b> |
| <b>Figura 26.....</b> | <b>79</b> |
| <b>Figura 27.....</b> | <b>82</b> |
| <b>Figura 28.....</b> | <b>83</b> |
| <b>Figura 29.....</b> | <b>85</b> |
| <b>Figura 30.....</b> | <b>87</b> |
| <b>Figura 31.....</b> | <b>88</b> |
| <b>Figura 32.....</b> | <b>89</b> |
| <b>Figura 33.....</b> | <b>89</b> |

## Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo principal desarrollar un modelo hidrodinámico 1D/2D para analizar el comportamiento del sistema de drenaje dual en una subcuenca ubicada en la zona nororiental de la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander. Este modelo busca caracterizar las dinámicas de escurrimiento y acumulación de agua en el área de estudio, con el fin de identificar las zonas más susceptibles a inundaciones y los peligros asociados para la comunidad local. Para ello, se recopilaron datos clave como un Modelo Digital de Elevación (DEM), información sobre los usos del suelo, y datos de la red de alcantarillado existente, incluyendo pozos, conductos y salidas. Además, se realizó un análisis detallado de los eventos de precipitación mediante la construcción de hietogramas basados en las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), utilizando datos históricos de la estación meteorológica más cercana.

Posteriormente, se utilizó el software InfoWorks ICM para integrar estos datos y configurar un modelo hidrodinámico que representara tanto el flujo superficial como el subterráneo. La zona de estudio fue configurada con una malla de resolución variable para equilibrar la precisión y la eficiencia computacional, mientras que los parámetros como las condiciones de contorno y los coeficientes de rugosidad fueron ajustados según las características específicas del uso del suelo. Finalmente, se simularon eventos de lluvia extrema con tiempos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, evaluando el comportamiento del flujo y la capacidad de las infraestructuras de drenaje existentes. Los resultados mostraron velocidades promedio de flujo superficial de 0.45 m/s a 0.8 m/s y alturas máximas de acumulación de hasta 1.5 m en zonas críticas como la avenida Guaimaral y el barrio Zulima.

### **Abstract**

The main objective of this research was to develop a 1D/2D hydrodynamic model to analyze the behavior of the dual drainage system in a sub-basin located in the northeastern area of the city of Cúcuta, Norte de Santander. This model seeks to characterize the dynamics of runoff and water accumulation in the study area, in order to identify the areas most susceptible to flooding and the associated hazards for the local community. To do so, key data were collected such as a Digital Elevation Model (DEM), information on land uses, and data from the existing sewer network, including wells, conduits, and outlets. In addition, a detailed analysis of precipitation events was carried out by constructing hyetographs based on Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves, using historical data from the nearest meteorological station. Subsequently, InfoWorks ICM software was used to integrate these data and configure a hydrodynamic model that represents both surface and subsurface flow. The study area was configured with a variable resolution mesh to balance computational accuracy and efficiency, while parameters such as boundary conditions and roughness coefficients were adjusted according to the specific characteristics of the land use. Finally, extreme rainfall events with return times of 10, 25, 50, and 100 years were simulated, evaluating the flow behavior and capacity of existing drainage infrastructures. The results showed average surface flow velocities of 0.45 m/s to 0.8 m/s and maximum accumulation heights of up to 1.5 m in critical areas such as Guaimaral Avenue and the Zulima neighborhood.

## Introducción

El cambio climático ha intensificado la frecuencia y severidad de eventos meteorológicos extremos, como lluvias torrenciales, que afectan significativamente a las áreas urbanas. Este fenómeno, combinado con la expansión urbana desordenada, ha incrementado la vulnerabilidad de las ciudades a las inundaciones pluviales. En particular, la ciudad de Cúcuta, ubicada en la región nororiental de Colombia, enfrenta desafíos considerables debido a su crecimiento urbano acelerado y a la insuficiencia de sus infraestructuras de drenaje para manejar eventos de precipitación extrema.

La urbanización descontrolada ha llevado a la impermeabilización de grandes superficies, reduciendo la capacidad de infiltración del suelo y aumentando la escorrentía superficial. Este proceso sobrecarga los sistemas de drenaje existentes, que a menudo no están diseñados para manejar los volúmenes de agua generados durante lluvias intensas, resultando en inundaciones que afectan la infraestructura, la movilidad y la calidad de vida de los habitantes (Olcina, 2024).

El cambio climático ha exacerbado esta situación, incrementando la frecuencia e intensidad de las precipitaciones extremas. Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), se espera que las precipitaciones extremas aumenten en intensidad y frecuencia en muchas regiones, incluyendo América Latina, debido al calentamiento global (IPCC, 2021). Este incremento en eventos de lluvia intensa representa un desafío adicional para las ciudades que ya enfrentan problemas de drenaje y gestión del agua.

En este contexto, la implementación de modelos hidrodinámicos 1D/2D se presenta como una herramienta eficaz para analizar y predecir el comportamiento de las inundaciones urbanas.

Estos modelos permiten simular la interacción entre el flujo superficial y las redes de alcantarillado, proporcionando información valiosa para la planificación y gestión del riesgo de inundaciones (Bermúdez et al., 2017). En particular, el uso de software especializado como InfoWorks ICM facilita la integración de múltiples variables y escenarios, permitiendo una comprensión más precisa de las dinámicas hídricas en entornos urbanos complejos.

La ciudad de Cúcuta, debido a su ubicación geográfica y características urbanas, es especialmente susceptible a las inundaciones pluviales. La subcuenca nororiental de la ciudad ha experimentado eventos de inundación recurrentes que han afectado negativamente a las comunidades locales y a la infraestructura urbana. La falta de herramientas de análisis avanzadas ha limitado la capacidad de las autoridades locales para planificar e implementar medidas efectivas de mitigación y adaptación.

El presente estudio tuvo como objetivo desarrollar un modelo hidrodinámico 1D/2D para la subcuenca nororiental de Cúcuta, utilizando la herramienta computacional InfoWorks ICM de la empresa Autodesk, con el fin de identificar las zonas más propensas a eventos de inundación, conociendo a su vez las velocidades y profundidades de flujo máximas para diferentes eventos de precipitación máxima. La implementación de este modelo proporcionará una herramienta valiosa para la toma de decisiones en la gestión del peligro de inundaciones, contribuyendo a la resiliencia urbana y al bienestar de la población.

## **Descripción del Proyecto**

### **Planteamiento del Problema**

En los países en desarrollo, el rápido crecimiento de las poblaciones urbanas y la expansión desordenada de las ciudades han generado una serie de desafíos relacionados con la gestión del agua y la infraestructura de drenaje. Este fenómeno es especialmente preocupante en ciudades como Cúcuta, donde la urbanización ha incrementado significativamente las superficies impermeables, reduciendo la infiltración del agua al suelo y aumentando los volúmenes de escorrentía superficial. Este problema se ve agravado por la insuficiencia de las redes de drenaje existentes, diseñadas para condiciones muy diferentes a las actuales 【Aragón-Durand, 2014】 .

En las áreas urbanas, las inundaciones representan un problema crítico debido a la alta concentración de personas, bienes e infraestructuras. Según estudios, las inundaciones no solo generan daños económicos, sino que también interrumpen servicios esenciales como hospitales, energía y comunicaciones, comprometiendo el funcionamiento de las ciudades 【Cubides & Santos, 2018】 . En Colombia, estas problemáticas se intensifican debido a su diversidad climática y la frecuencia de eventos extremos. Entre 1914 y 2019, las inundaciones representaron el 30% de los desastres naturales registrados en el país (González-Velandia, 2014) .

En la ciudad de Cúcuta, la subcuenca nororiental es una de las áreas más afectadas por inundaciones recurrentes. La infraestructura de drenaje actual no es capaz de manejar el volumen de agua generado durante eventos de lluvia intensa, lo que provoca desbordamientos que afectan la calidad de vida de los habitantes, dañan infraestructuras y aumentan el riesgo de enfermedades relacionadas con el agua estancada. A pesar de los intentos por aumentar la capacidad de las redes

de drenaje, estas soluciones han demostrado ser costosas e ineficaces, ya que también reducen procesos naturales como la infiltración y la evapotranspiración, exacerbando el problema (UNGRD, 2020)

Actualmente, no existe un modelo hidrodinámico 1D/2D del drenaje urbano para esta zona que permita analizar con precisión el comportamiento espacio-temporal de la escorrentía superficial y subterránea. Esta ausencia limita la capacidad de planificar, optimizar y diseñar sistemas de drenaje adaptados a las condiciones específicas de la ciudad. Por lo tanto, la implementación de un modelo avanzado para analizar estas dinámicas se presenta como una necesidad urgente.

### **Justificación**

Las inundaciones son uno de los fenómenos naturales que más pérdidas humanas y económicas generan a nivel mundial. Esta problemática es especialmente preocupante en ciudades de países en desarrollo, donde el crecimiento urbano acelerado y la falta de planificación adecuada han incrementado significativamente la exposición y vulnerabilidad a estos eventos. A este contexto se suma el impacto del cambio climático, que ha intensificado la frecuencia y magnitud de las lluvias extremas, afectando la infraestructura y la seguridad de las poblaciones urbanas.

En Cúcuta, la situación no es diferente. La subcuenca nororiental enfrenta constantes eventos de inundación debido a la insuficiencia de su red de drenaje, diseñada para condiciones menos exigentes que las actuales. La impermeabilización del suelo, resultado de la urbanización desorganizada, ha reducido la infiltración y aumentado el escurrimiento superficial, generando

acumulaciones de agua que afectan la movilidad, dañan infraestructuras críticas y ponen en peligro la seguridad y la salud de sus habitantes.

Además, la falta de herramientas técnicas avanzadas limita la capacidad de las autoridades locales para analizar, planificar y mitigar el impacto de las inundaciones. La ausencia de modelos hidrodinámicos que integren tanto el flujo superficial (2D) como el subterráneo (1D) dificulta la identificación precisa de las zonas de riesgo y la implementación de estrategias de mitigación efectivas. Esto agrava el impacto de las inundaciones, exponiendo a la población a mayores riesgos y dificultando la recuperación económica y social tras cada evento.

Esta investigación busca llenar este vacío mediante el desarrollo de un modelo hidrodinámico 1D/2D en la subcuenca nororiental de Cúcuta utilizando el software InfoWorks ICM. Este modelo permitirá analizar el comportamiento de las aguas superficiales y subsuperficiales durante eventos de precipitación extrema, identificando las áreas más vulnerables y proporcionando datos clave para el diseño de soluciones integrales y sostenibles.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Generar un modelo hidrodinámico (1D/2D) para el análisis de inundaciones urbanas en una subcuenca de la zona nororiental de la ciudad de Cúcuta, que permita conocer el comportamiento espacio temporal de la esorrentía ante un evento extremo del clima.

### **Objetivos Específicos**

- ❖ Recolectar la información de la zona de estudio como análisis técnico y descriptivo con el fin de obtener los parámetros geomorfológicos.
- ❖ Obtener los hietogramas de diseño mediante las curvas IDF utilizando el método de bloques alternos, para su aplicación en el modelo hidrodinámico de la cuenca en estudio.
- ❖ Construir el modelo hidrodinámico de la cuenca en estudio mediante la información existente, verificando las soluciones numéricas de las ecuaciones que rigen el flujo.
- ❖ Modelar mediante el software INFOWORKS ICM la cuenca urbana para conocer el comportamiento espacio temporal de la escorrentía ante un evento extremo del clima.
- ❖ Evaluar el peligro de inundaciones urbanas y sus implicaciones para la seguridad de los peatones mediante el análisis de variables hidráulicas del modelo hidrodinámico.

### **Marco Referencial**

#### **Marco de antecedentes o estado del arte**

(Acosta-Coll et al., 2018) Discuten la importancia de la gestión del riesgo de inundaciones pluviales urbanas y la necesidad de respuestas comunitarias y sistemas de alerta temprana. En su investigación describen el desarrollo de un sistema de alerta temprana (SAT) de bajo costo para inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia. El EWS utiliza modelos hidrológicos e hidráulicos para calcular el nivel, la velocidad y el caudal del agua en las secciones transversales de los arroyos en una cuenca no aforada utilizando únicamente pluviómetros y datos topográficos. El sistema tiene como objetivo proporcionar información oportuna a la comunidad

sobre el nivel peligroso de la corriente durante los eventos de lluvia. El EWS consta de nodos instalados en postes de electricidad, que transmiten datos en tiempo real a un servidor web. El modelo tiene una resolución temporal de 1 minuto y resolución espacial de 50 metros y permite predicciones de hasta 3 horas.

(Bonilla et al., 2022) Presentan una metodología para el diseño de sumideros de captación de aguas lluvias en zonas urbanas, considerando aspectos hidrológicos, hidráulicos y geométricos. El documento explica los conceptos básicos de los sistemas de drenaje urbano, los tipos y características de los sumideros, y los criterios para su ubicación y dimensionamiento. El documento también presenta un caso de estudio aplicado a la ciudad de Cúcuta, Colombia, donde se analiza el comportamiento hidrológico e hidráulico de diferentes tipos de sumideros bajo diferentes escenarios de precipitación. Los resultados muestran que los sumideros tipo rejilla son los más eficientes para la captación de aguas lluvias, seguidos por los sumideros tipo boca de lobo y los sumideros tipo cuneta. El documento concluye que el diseño de sumideros debe considerar las condiciones locales de cada zona urbana, así como las normas técnicas vigentes.

(Concha Jopia & Valentin, 2011) Explican los componentes de un sistema de drenaje urbano dual y cómo se puede usar EPA SWMM 5.0 para modelarlos. comparan los enfoques tradicionales y duales para modelar sistemas de drenaje urbano y muestra que el enfoque dual proporciona una representación más precisa del comportamiento hidráulico del entorno urbano. También presenta los resultados de una simulación y compara los resultados obtenidos con ambos enfoques. En general, el artículo brinda detalles técnicos y recomendaciones para modelar sistemas duales de drenaje.

(Rincón Ortiz & Muñoz, 2013). El artículo "Diseño hidráulico de sistemas de drenaje dual a través del modelo SWMM" presenta una metodología innovadora para el diseño de sistemas de drenaje urbano, utilizando el software SWMM-5.0. Tradicionalmente, el diseño de drenajes se ha realizado manualmente mediante el método racional y el flujo uniforme, lo cual presenta limitaciones significativas, especialmente en cuencas pequeñas y en la variabilidad temporal de la lluvia. La metodología propuesta permite la modelación dual (drenaje superficial y alcantarillado), incorporando el factor temporal y la no uniformidad del flujo. Aplicada en la urbanización Copacoa, Estado Lara, Venezuela, los resultados demuestran que este método es viable y eficiente, proporcionando diseños más económicos y facilitando el análisis de múltiples escenarios de forma rápida. Este enfoque no solo simula adecuadamente el flujo en calles y colectores, sino que también ofrece una herramienta valiosa para mejorar las condiciones de drenaje en áreas urbanas.

(Zhou, 2014). Este artículo revisa el progreso reciente en el desarrollo de sistemas de drenaje urbano sostenible (SuDS) en el contexto de los desafíos planteados por el cambio climático y la urbanización. Presenta los elementos y criterios clave para su diseño, así como varios dispositivos y ejemplos de estos sistemas. Los resultados destacan las limitaciones y dificultades en la implementación de soluciones innovadoras y sugieren un enfoque integrado y transdisciplinario para el diseño de drenajes sostenibles, que mejoran tanto la calidad como la cantidad del agua y ofrecen beneficios recreativos en los paisajes urbanos.

(Cea & Bladé, 2015). El estudio presenta un esquema de volumen finito no estructurado para resolver las ecuaciones de aguas poco profundas en flujos superficiales, crucial para la gestión de recursos hídricos y la prevención de desastres. Utilizando celdas poligonales arbitrarias, el método se implementó en el software Iber para simular flujos en terrenos complejos. Las

simulaciones mostraron precisión y eficiencia, comparándose favorablemente con datos experimentales y otros modelos existentes, destacando en tiempo de cálculo y manejo de geometrías complejas. Este esquema es una herramienta útil y robusta para diversas aplicaciones de flujo superficial, ofreciendo mejoras significativas respecto a métodos tradicionales.

(Bermúdez et al., 2018) Presentan el desarrollo y comparación de dos modelos sustitutos rápidos para simular inundaciones pluviales urbanas. Las inundaciones urbanas son un problema importante en muchas ciudades del mundo, y los modelos de inundaciones precisos y eficientes son esenciales para una gestión eficaz de las inundaciones. Sin embargo, el desarrollo de modelos basados en la física de alta fidelidad puede ser desafiante y costoso desde el punto de vista computacional. Por lo tanto, los modelos sustitutos basados en datos se han vuelto cada vez más populares en los últimos años. El primer modelo sustituto presentado se basa en un modelo de red de alcantarillado 1D, en el que los volúmenes de inundación se almacenan en depósitos virtuales encima de las bocas de acceso. El mapeo de inundaciones se realiza mediante un algoritmo de dispersión de volumen GIS. El segundo modelo sustituto combina un modelo de alcantarillado hidráulico agrupado conceptual con un modelo de inundación simplificado, utilizando estructuras tanto basadas en datos como basadas en la física. El mapeo de inundaciones se basa en escenarios presimulados. Los modelos se probaron utilizando la ciudad de Gante en Bélgica como estudio de caso. Los modelos se evaluaron en función de su capacidad para predecir los volúmenes máximos de inundación superficial y los mapas de extensión y profundidad máxima de inundación. Los resultados mostraron que ambos modelos sustitutos proporcionaron resultados comparables al modelo 1D-2D original, con una reducción significativa en el tiempo de cómputo.

(Andimuthu et al., 2019) Realizan un estudio sobre el desempeño de la red de drenaje pluvial urbano bajo escenarios de cambio climático en una ciudad costera de la India: Chennai. El objetivo es evaluar la capacidad de la red para mitigar las inundaciones en una de las zonas más vulnerables de la ciudad: Velachery. Para ello, se utilizan los modelos CMIP5 del IPCC para generar posibles escenarios futuros de precipitación y se desarrollan curvas IDF para diferentes períodos de retorno. Luego, se realiza una modelación hidráulica e hidrológica integrada para estimar el caudal máximo y el nivel de agua en los canales de drenaje bajo los escenarios actuales y futuros. Los resultados muestran que la red existente es insuficiente para manejar las lluvias extremas y que se requieren medidas de adaptación para reducir el riesgo de inundación en Velachery. El artículo ejemplifica cómo el cambio climático afecta a las ciudades costeras y la importancia de una gestión adecuada del agua pluvial. El artículo se basa en datos obtenidos del Departamento Meteorológico de la India, el Instituto de Energía de Fusión de Corea y una encuesta con DGPS.

(Aranda et al., 2021). Este artículo aborda el diseño eficiente de sistemas de drenaje en carreteras y instalaciones de transporte, un desafío crítico debido al exceso de agua superficial durante eventos de tormenta que puede causar escenarios peligrosos para el tráfico. El método presentado se basa en la simulación numérica hidráulica y la evaluación de la eficiencia de rejillas de entrada usando el modelo Iber, aplicable a criterios de diseño según regulaciones de diferentes países. Facilita análisis de sensibilidad del rendimiento de distintas disposiciones de rejillas, proporcionando información hidráulica detallada que permite comparaciones y decisiones más informadas para maximizar la eficiencia de las soluciones

(Cortés-Zambrano et al., 2021) Crearon un modelo de drenaje urbano validado y calibrado en el programa SWMM5.1, que permite obtener la modelación hidrodinámica temporal del sistema. El modelo resultó en la detección de dos áreas que son vulnerables a inundaciones. El estudio recomienda la calibración y reconstrucción de las estructuras de relieve del sector para controlar la dilución de aguas residuales, favoreciendo el funcionamiento de los procesos biológicos en la planta de tratamiento de aguas residuales de Tunja.

(Guo et al., 2021) Presentaron de forma exhaustiva los modelos y enfoques emergentes para predecir la inundación de agua superficial urbana causada por lluvias intensas. El artículo explora las ventajas y limitaciones de los tipos de modelos existentes, resalta los avances más recientes e identifica los principales desafíos. El artículo tiene cuatro secciones principales: introducción, tipos de modelos, avances recientes y desafíos futuros. En la introducción, se presenta el contexto y la motivación del estudio, así como los objetivos y el alcance de la revisión. En la sección de tipos de modelos, se clasifican y comparan los modelos existentes según su estructura matemática, su representación del terreno y del sistema de drenaje, y su método numérico. En la sección de avances recientes, se analizan las tendencias y las innovaciones en el desarrollo de los modelos, como el uso de datos de alta resolución, el acoplamiento de modelos hidrológicos e hidráulicos, la incorporación de incertidumbres y la aplicación de técnicas de aprendizaje automático. En la sección de desafíos futuros, se discuten las limitaciones y las necesidades de los modelos actuales, como la complejidad del modelo, el efecto de escala, la eficiencia computacional y la validación del modelo.

(Zhou et al., 2021) Exponen una metodología de apoyo a la decisión multicriterio para la selección y priorización de intervenciones de rehabilitación en infraestructuras urbanas de agua,

considerando el rendimiento, el costo y el riesgo y una perspectiva a largo plazo. La metodología se divide en tres etapas principales: identificación del problema, estructuración y evaluación. La estructuración del problema, una etapa crucial para los resultados incluye identificar los objetivos, seleccionar los escenarios dentro del período de análisis, definir las opciones del problema y el tipo de problemática. La evaluación del problema incluye la selección de las métricas de evaluación, la selección del método de agregación, la aplicación del método, el análisis de sensibilidad, robustez y las recomendaciones finales. La metodología se aplica a un caso real de estudio de un sistema de distribución de agua.

(Dong et al., 2022) Analizan varios modelos numéricos para simular inundaciones urbanas y evaluación del riesgo de inundaciones, incluido un modelo hidrodinámico integrado de flujos de alcantarillado 2D superficiales y 1D. El modelo propuesto puede simular con precisión todos los procesos de inundación urbana y evaluar los riesgos de inundación para personas y vehículos en aguas de inundación. también destaca la necesidad de medidas para minimizar el riesgo de inundaciones urbanas. El modelo se valida mediante experimentos de laboratorio y se aplica para simular una inundación repentina en Glasgow, Reino Unido. El estudio encuentra que los sistemas de drenaje urbano pueden mitigar eficazmente los desastres por inundaciones al reducir la profundidad del agua de inundación y disminuir la velocidad del flujo, pero para áreas inundadas con grandes profundidades de agua, el proceso de drenaje puede aumentar la velocidad local y generar riesgos potenciales. inundadas con grandes profundidades de agua, el proceso de drenaje puede aumentar la velocidad local y generar riesgos potenciales.

(Van Assel et al., 2023). Este artículo presenta una metodología para calcular las series temporales de flujo en sistemas de drenaje urbano a partir de mediciones operativas en estaciones

de bombeo. Los resultados de cuatro ubicaciones piloto demuestran el potencial de esta metodología para ser implementada a gran escala, contribuyendo a una mejor comprensión y remediación de las infiltraciones y entradas no deseadas en la planificación de la gestión de drenajes urbanos.

(Montalvo et al., 2024). Este estudio aborda las inundaciones pluviales urbanas, que son eventos complejos y de rápida evolución debido a precipitaciones intensas que superan la capacidad de las redes de alcantarillado. Se presenta un enfoque basado en la física que utiliza datos accesibles públicamente y una herramienta para generar redes de alcantarillado virtuales. Aplicado en Sada, España, el método comparó redes virtuales con datos reales de alcantarillado mediante el modelo Iber-SWMM. Los resultados de cuatro tormentas demostraron que el enfoque propuesto representa adecuadamente la capacidad de drenaje durante inundaciones, superando métodos simplificados. Este enfoque robusto puede aplicarse a cualquier área urbana sin información adecuada de alcantarillado, permitiendo la identificación realista de áreas propensas a inundaciones pluviales.

## **Marco teórico**

### ***Inundaciones Urbanas y su Gestión.***

Las inundaciones urbanas son eventos recurrentes en muchas ciudades debido a la combinación de fenómenos meteorológicos extremos y la expansión urbana descontrolada. Este fenómeno ocurre cuando las infraestructuras de drenaje pluvial no pueden manejar el volumen de agua generado por lluvias intensas, lo que resulta en el desbordamiento del agua en las calles y propiedades urbanas (Wheater & Evans, 2009). La urbanización ha incrementado

significativamente las superficies impermeables, reduciendo la infiltración del agua y aumentando la escorrentía superficial, lo que agrava la situación de las inundaciones (Ashley et al., 2005).

### ***Modelos Hidrodinámicos en la Gestión de Inundaciones.***

Los modelos hidrodinámicos son herramientas matemáticas cruciales en la gestión de inundaciones urbanas. Estos modelos permiten simular el comportamiento del flujo de agua en diferentes escenarios, proporcionando información valiosa para el diseño y la optimización de sistemas de drenaje. Las ecuaciones de Saint-Venant, tanto en su forma unidimensional (1D) como bidimensional (2D), son la base teórica para estos modelos, permitiendo describir el movimiento del agua en términos de continuidad y cantidad de movimiento (Chanson, 2004).

### ***Drenaje Urbano: Red Menor y Red Mayor***

El sistema de drenaje urbano se divide en dos subsistemas: la red de alcantarillado (red menor) y la red superficial (red mayor). La red menor se encarga del manejo de flujos regulares y medianos, y está compuesta por alcantarillas, sumideros y colectores pluviales. En contraste, la red mayor maneja el exceso de agua durante eventos de lluvia intensa, canalizando el flujo superficial a través de calles, parques y canales naturales (Butler & Davies, 2011). La interacción entre estos subsistemas es crítica para la eficacia del sistema de drenaje, permitiendo el flujo bidireccional a través de entradas y pozos de registro.

### ***Modelos de Drenaje Dual.***

Los modelos de drenaje dual simulan la interacción entre la red de alcantarillado y el flujo superficial, proporcionando una visión integrada del sistema de drenaje urbano. Este enfoque permite una evaluación más realista del comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones

de lluvia, considerando el intercambio de flujo entre los subsistemas menor y mayor. Martins et al. (2017) destacan la importancia de estos modelos para identificar puntos críticos de inundación y optimizar las infraestructuras de drenaje existentes.

### ***InfoWorks ICM***

InfoWorks ICM (Integrated Catchment Model) es un software avanzado diseñado para la simulación y análisis de sistemas de drenaje urbano, flujos fluviales y la interacción entre redes de flujo superficial (2D) y subterráneo (1D). Desarrollado originalmente por Innovyze y ahora parte de Autodesk, InfoWorks ICM proporciona una plataforma robusta para crear modelos hidráulicos e hidrológicos detallados, integrando tanto sistemas unidimensionales como bidimensionales. Esto permite una representación precisa del comportamiento del agua en áreas urbanas y rurales, facilitando la planificación de infraestructuras hidráulicas, la evaluación de riesgos y el diseño de estrategias de mitigación. (Autodesk, 2024a).

El software incluye funcionalidades avanzadas que lo hacen idóneo para:

- Modelado de inundaciones urbanas y fluviales.
- Evaluación de infraestructura hidráulica.
- Análisis de la interacción entre sistemas 1D (red subterránea) y 2D (flujo superficial).
- Optimización de redes de drenaje urbano.

InfoWorks ICM es especialmente útil para simulaciones hidrodinámicas que integran múltiples sistemas, abordando de manera simultánea las dinámicas de flujo superficial e infraestructura subterránea, proporcionando una visión integral del comportamiento del agua.

### ***Ecuaciones Utilizadas en InfoWorks ICM***

**Ecuaciones para el Modelado 1D (Redes Subterráneas).** Para representar el comportamiento de las redes de alcantarillado, InfoWorks ICM emplea las Ecuaciones de Saint-Venant unidimensionales:

Ecuación de Continuidad:

**ecuación 1**

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

Donde:

- A: Área transversal del flujo (m<sup>2</sup>).
- Q: Caudal (m<sup>3</sup>/s)

Ecuación de Cantidad de Movimiento:

**ecuación 2**

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f = 0$$

Donde:

- g: Gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>).
- h: Altura del agua (m).
- S<sub>f</sub>: Gradiente de fricción.

### Fórmula de Manning para Conductos:

ecuación 3

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2}$$

Donde:

- V: Velocidad del flujo.
- R: Radio hidráulico.

**Ecuaciones para el Modelado 2D (Flujos Superficiales).** InfoWorks ICM utiliza las Ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales, también conocidas como Ecuaciones de Aguas Poco Profundas (Shallow Water Equations). Estas ecuaciones describen el flujo de agua sobre una superficie libre y son fundamentales para simular inundaciones y escorrentías superficiales. Las ecuaciones principales son:

Ecuación de Continuidad (Conservación de Masa):

ecuación 4

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

Donde:

- h: Altura del agua (m).
- t: Tiempo (s).
- u,v: Velocidades en las direcciones x y y (m/s).

Ecuación de Cantidad de Movimiento en x:

**ecuación 5**

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hu^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh \frac{\partial z}{\partial x} - \tau_{bx}$$

Ecuación de Cantidad de Movimiento en y:

**ecuación 6**

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( hv^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = gh \frac{\partial z}{\partial y} - \tau_{by}$$

Fórmula de Manning para Fricción:

**ecuación 7**

$$\tau_b = \frac{n^2 \cdot u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$$

Donde:

- n: Coeficiente de rugosidad de Manning.
- h: Altura del flujo.

**Interacción entre Modelos 1D y 2D.** El software permite el acoplamiento entre sistemas subterráneos y superficiales:

**Desbordamientos:** Cuando los conductos subterráneos alcanzan su capacidad máxima, el flujo excedente se transfiere a la superficie.

**Reflujo:** El agua superficial puede infiltrarse nuevamente en el sistema subterráneo, dependiendo de las condiciones hidráulicas.

### ***Criterios de Peligrosidad en Inundaciones Urbanas***

Para evaluar el impacto de las inundaciones urbanas y su nivel de peligrosidad para los peatones, se empleó el criterio propuesto por Martínez Gomariz (2016). Este enfoque define los niveles de riesgo en función de las variables hidráulicas principales: la **profundidad del flujo (calado,  $y$ )** y la **velocidad del flujo ( $v$ )**, así como el producto entre ambas ( $v \cdot y$ ).

Según Martínez Gomariz (2016), los límites de seguridad son los siguientes:

- **Velocidad ( $v$ ):** Valores bajos de velocidad son considerados seguros, mientras que velocidades superiores a 1 m/s incrementan el riesgo de inestabilidad y arrastre.
- **Profundidad ( $y$ ):** Cuando el calado supera los 0.5 m, la capacidad de los peatones para desplazarse con estabilidad se ve comprometida.
- **Producto  $v \cdot y$  ( $m^2/s$ ):** Este indicador evalúa la peligrosidad combinada de la velocidad y la profundidad del flujo, estableciendo valores críticos que definen los niveles de riesgo.

**Tabla 1.**

*Criterios Adoptados para la Clasificación de la Peligrosidad.*

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

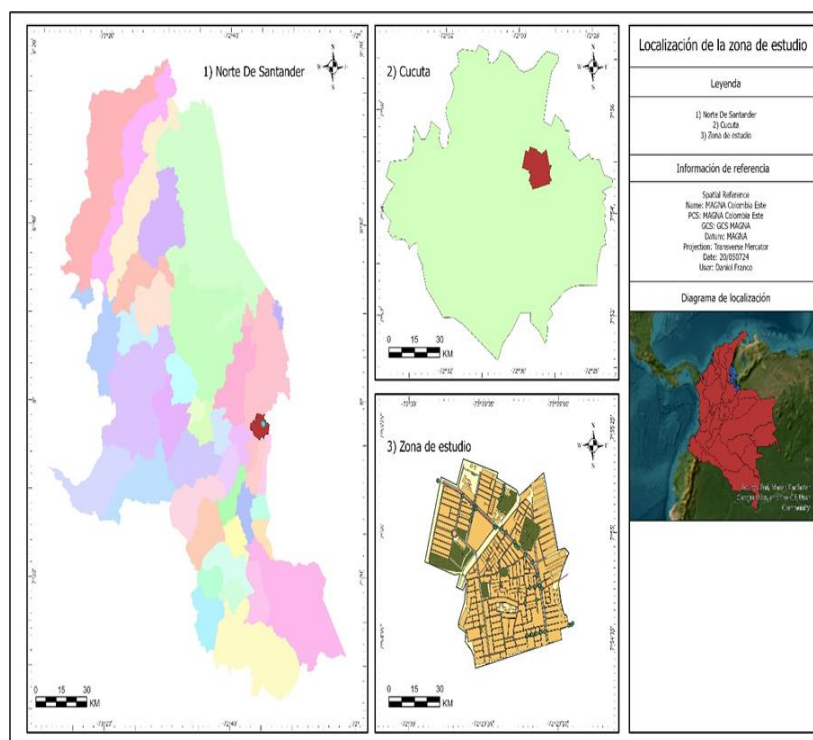
*Nota.* Esta clasificación de peligrosidad considera la profundidad del flujo ( $y$ ), el producto entre velocidad y calado ( $v \cdot y$ ) y un umbral crítico de velocidad ( $v > 1.88 \text{ m/s}$ ) como parámetros determinantes. Fuente: Martínez Gomariz (2016).

## **Marco Legal**

## **Marco Contextual**

### ***Ubicación y Generalidades.***

La investigación se desarrollará en la ciudad de Cúcuta, capital del departamento de Norte de Santander, en Colombia. Cúcuta se encuentra ubicada en la frontera con Venezuela, siendo un importante centro urbano y comercial de la región. La ciudad está situada a una altitud de aproximadamente 320 metros sobre el nivel del mar y cuenta con un clima tropical de sabana, caracterizado por temperaturas elevadas y lluvias estacionales.

**Figura 1.***Localización de la zona de estudio.*

*Nota.* La figura representa la localización de la zona de estudio, Cúcuta-Norte De Santander. También muestra la delimitación de las zonas.

### ***Extensión y Límites.***

Cúcuta abarca una superficie de aproximadamente 1,176 km<sup>2</sup>. Limita al norte con el municipio de Puerto Santander y el estado Zulia en Venezuela, al sur con los municipios de San Cayetano y El Zulia, al este con el municipio de Tibú y el estado Táchira en Venezuela, y al oeste con los municipios de Los Patios y Villa del Rosario. Esta ubicación estratégica la convierte en un punto clave para el comercio binacional.

***Demografía.***

Según datos recientes, Cúcuta tiene una población aproximada de 750,000 habitantes, lo que la convierte en una de las ciudades más pobladas del país. La ciudad ha experimentado un crecimiento poblacional significativo en las últimas décadas, impulsado por la migración interna y la afluencia de venezolanos debido a la crisis en el país vecino.

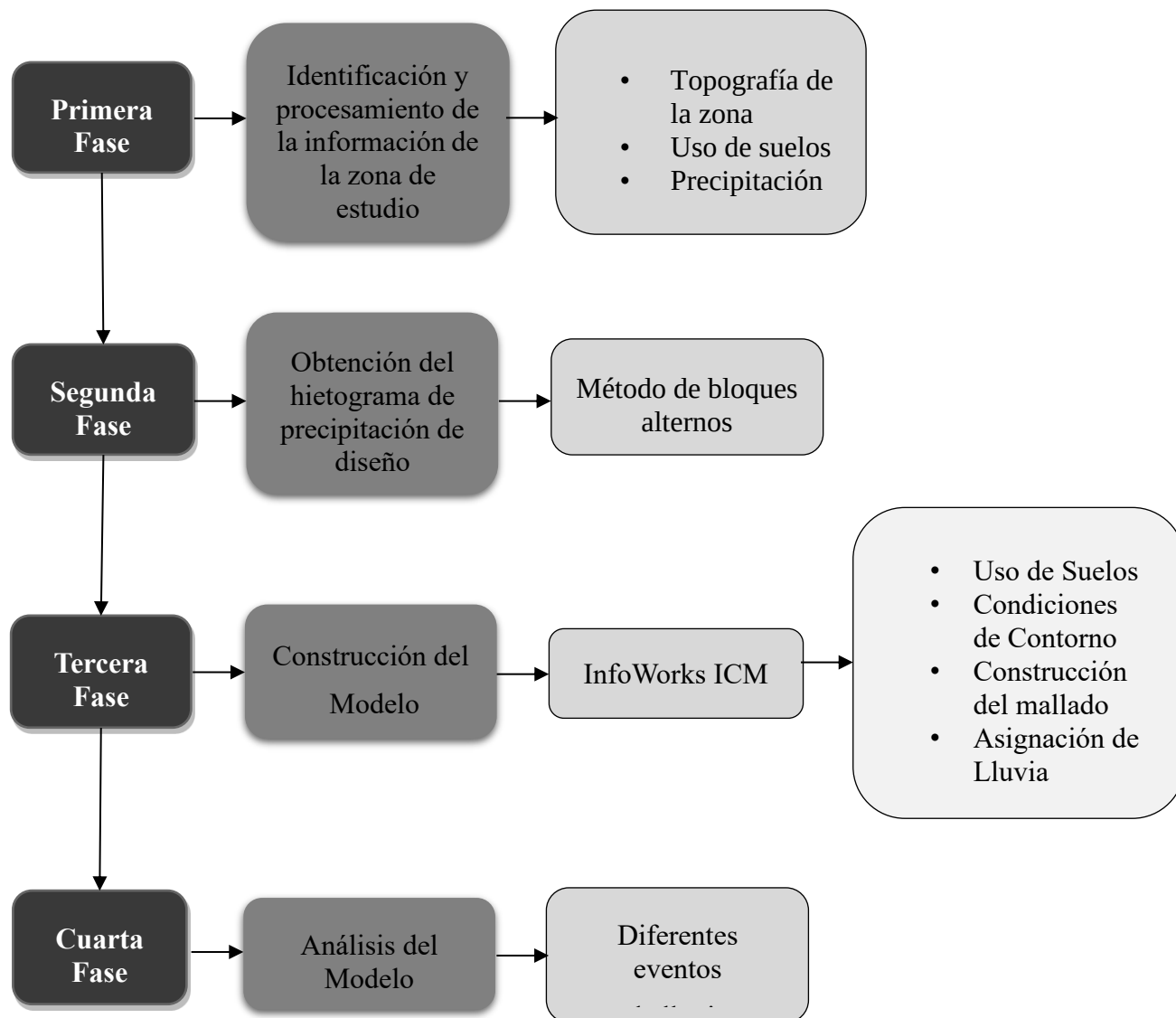
***Cultura.***

Cúcuta es una ciudad con una rica herencia cultural y una mezcla diversa de tradiciones. La ciudad celebra numerosas festividades a lo largo del año, incluyendo el Carnaval del Oriente Colombiano y el Festival Internacional de la Frontera, que reflejan su vibrante vida cultural. La gastronomía cucuteña es también un aspecto destacado, con platos tradicionales como el cabrito, la mute (sopa de maíz y carne) y los dulces típicos como el bocadillo veleño. (vacations Group, 2024)

***Infraestructura y Desafíos Urbanos.***

La rápida urbanización de Cúcuta ha presentado numerosos desafíos en términos de infraestructura y planificación urbana. El crecimiento desordenado ha generado problemas significativos de manejo de aguas pluviales y drenaje, exacerbados por las características geográficas y climáticas de la región. Las inundaciones urbanas se han convertido en un problema recurrente, afectando la vida cotidiana de los habitantes y la infraestructura urbana. (Semana, 2022).

### Metodología



#### 1º Fase Identificación y procesamiento de la información de la zona de estudio

En esta fase inicial, se llevó a cabo la delimitación de la zona 2D de estudio, abarcando un área representativa de la subcuenca nororiental de la ciudad de Cúcuta, donde se identificaron dinámicas complejas de drenaje urbano y una alta susceptibilidad a inundaciones. La delimitación se realizó utilizando herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica), asegurando que los

límites seleccionados incluyeran tanto zonas urbanas críticas como áreas periféricas relevantes para el análisis de escorrentías. Esta etapa permitió establecer el marco espacial sobre el cual se desarrollaría el modelo hidrodinámico, configurando las bases para la integración de los flujos superficiales y subterráneos.

La recopilación de datos clave fue un componente esencial de esta fase, y se basó principalmente en los insumos generados por la investigación previa titulada “*Cuantificación de la Peligrosidad en Peatones por Inundaciones de Origen Pluvial en Cuencas Urbanas Usando Lenguaje de Programación Python y el Modelo Avanzado de Gestión de Aguas Pluviales (PCSWMM)*” (Sánchez Tapiero, 2023). Este trabajo previo proporcionó información detallada sobre aspectos hidráulicos y topográficos de la zona de estudio, estableciendo un punto de partida sólido para el desarrollo del modelo en InfoWorks ICM.

Entre los datos recopilados se incluyeron insumos fundamentales para garantizar la precisión y representatividad del modelo hidrodinámico:

### ***Usos del suelo***

Se recopilaron datos de los diferentes usos de suelo en la zona de estudio, considerando su relevancia para el modelado de la infiltración y escorrentía.

### ***Topografía de la zona***

La representación topográfica de la zona de estudio se realizó utilizando un Modelo Digital de Elevación (MDE) obtenido del satélite ALOS PALSAR, con una resolución espacial de 12.5 m. Este recurso fue extraído y procesado como parte de la investigación previa titulada “*Cuantificación de la Peligrosidad en Peatones por Inundaciones de Origen Pluvial en Cuencas*

*Urbanas Usando Lenguaje de Programación Python y el Modelo Avanzado de Gestión de Aguas Pluviales (PCSWMM) ”.*

Adicionalmente, se utilizó una ortofoto de alta resolución (4.3 cm/px), obtenida a una altura de 100 m, como recurso visual complementario para validar las características observadas en campo. La ortofoto no fue utilizada directamente en la construcción del modelo, pero sirvió como referencia para corroborar detalles específicos de la cobertura del terreno y las características de los usos de suelo.

**Figura 1.**

*ortofoto de la zona de estudio*



*Nota. Ortofoto tomada de la investigación “Cuantificación de la Peligrosidad en Peatones por Inundaciones de Origen Pluvial en Cuencas Urbanas Usando Lenguaje de Programación Python y el Modelo Avanzado de Gestión de Aguas Pluviales (PCSWMM)”*

### ***Red de alcantarillado***

Para el modelado hidrodinámico, se utilizó información detallada sobre la red de alcantarillado de la zona de estudio, la cual fue obtenida principalmente de la investigación previa titulada “Cuantificación de la Peligrosidad en Peatones por Inundaciones de Origen Pluvial en Cuencas Urbanas Usando Lenguaje de Programación Python y el Modelo Avanzado de Gestión de Aguas Pluviales (PCSWMM)” (Sánchez Tapiero, 2023). Este insumo resultó fundamental para caracterizar de manera precisa el sistema de drenaje subterráneo.

### **Componentes de la red**

La información recopilada incluyó:

- Pozos de inspección (manholes):
- Conductos
- Salidas (outfalls)

### ***Datos de precipitación***

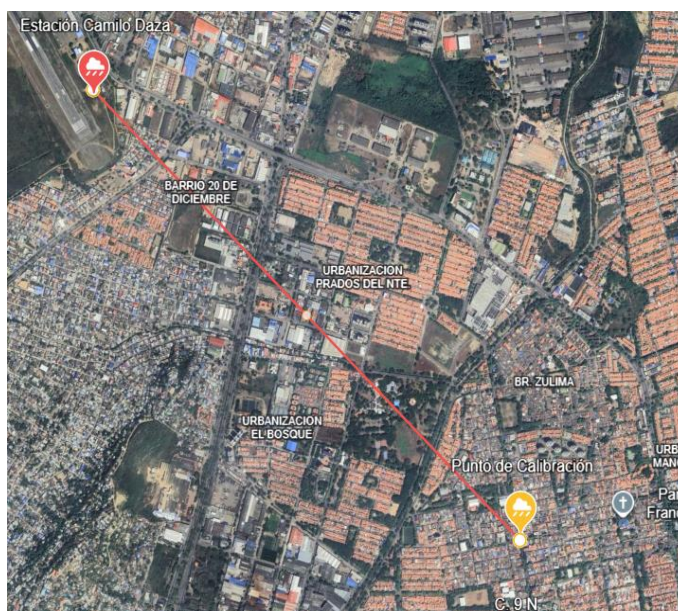
La información meteorológica utilizada en esta investigación fue obtenida del sitio web del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), específicamente de la estación meteorológica del Aeropuerto Camilo Daza. Esta estación fue seleccionada debido a su proximidad a la zona de estudio y a su extensa base de datos históricos, que supera los 70 años

de registros de precipitación. Estos datos fueron fundamentales para construir los hietogramas de precipitación utilizados en las simulaciones hidrodinámicas.

**Análisis de Proximidad.** Con el objetivo de asegurar la representatividad de los datos para la subcuenca de estudio, se realizó un análisis espacial utilizando el sistema de información geográfica (QGIS). Este análisis verificó que la estación meteorológica del Aeropuerto Camilo Daza se encontraba a menos de 10 km de la zona de estudio, cumpliendo con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para el espaciamiento de estaciones en áreas urbanas (Lanza et al., 2006).

**Figura 2.**

*Análisis de Proximidad entre la Estación Meteorológica y el Punto de Calibración.*



*Nota.* Mapa generado con QGIS que muestra la ubicación de la estación meteorológica del Aeropuerto Camilo Daza en relación con la subcuenca de estudio

**Tabla 2.***Datos de Precipitación*

| <b>Año</b>  | <b>Enero</b> | <b>Febrero</b> | <b>Marzo</b> | <b>Abril</b> | <b>Mayo</b> | <b>Junio</b> | <b>Julio</b> | <b>Agosto</b> | <b>Septiembre</b> | <b>Octubre</b> | <b>Noviembre</b> | <b>Diciembre</b> |
|-------------|--------------|----------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|---------------|-------------------|----------------|------------------|------------------|
| <b>1970</b> | 5.60         | 11.00          | 19.00        | 4.00         | 46.00       | 3.00         | 4.00         | 6.00          | 53.30             | 51.00          | 61.00            | 27.00            |
| <b>1971</b> | 33.00        | 43.50          | 19.00        | 12.00        | 58.20       | 19.20        | 10.20        | 15.10         | 0.00              | 64.40          | 23.50            | 39.40            |
| <b>1972</b> | 84.20        | 20.90          | 67.00        | 0.00         | 54.00       | 20.00        | 38.00        | 6.00          | 22.00             | 101.00         | 46.00            | 20.00            |
| <b>1973</b> | 20.00        | 40.00          | 6.80         | 95.20        | 21.80       | 14.30        | 12.70        | 3.20          | 65.00             | 28.10          | 28.70            | 77.30            |
| <b>1974</b> | 10.70        | 9.40           | 16.70        | 42.00        | 73.20       | 10.30        | 11.30        | 46.70         | 43.10             | 16.50          | 47.10            | 76.00            |
| <b>1975</b> | 9.00         | 3.10           | 8.30         | 53.10        | 20.70       | 26.10        | 10.10        | 7.30          | 19.60             | 57.50          | 94.20            | 43.10            |
| <b>1976</b> | 38.50        | 11.90          | 29.20        | 39.50        | 28.60       | 9.80         | 6.60         | 27.70         | 31.20             | 54.70          | 26.80            | 9.50             |
| <b>1977</b> | 20.00        | 2.60           | 41.90        | 00.00        | 20.20       | 12.40        | 19.40        | 14.70         | 17.30             | 42.80          | 43.20            | 14.80            |
| <b>1978</b> | 0.60         | 5.70           | 31.40        | 43.80        | 18.00       | 6.30         | 12.70        | 13.90         | 22.10             | 34.80          | 74.60            | 14.90            |
| <b>1979</b> | 13.20        | 15.60          | 41.70        | 23.00        | 38.00       | 68.10        | 3.80         | 13.20         | 11.00             | 83.70          | 38.40            | 19.00            |
| <b>1980</b> | 41.90        | 13.60          | 20.40        | 12.30        | 25.00       | 7.70         | 4.00         | 7.50          | 60.00             | 22.80          | 65.00            | 56.50            |

*Nota.* La Tabla presenta un resumen de las características de los eventos de precipitación registrados en la estación Aeropuerto Camilo Daza.

***Procesamiento de la información***

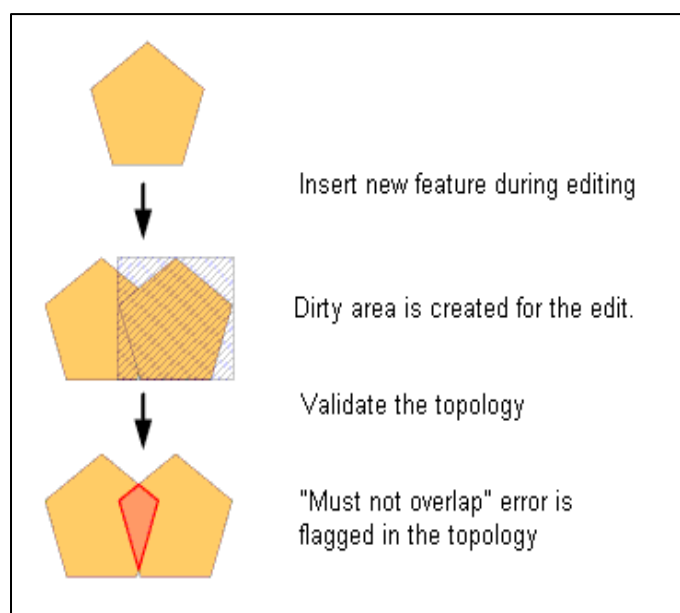
Una vez recopilada la información, se procedió a su procesamiento para integrarla de manera adecuada en el modelo hidrodinámico en InfoWorks ICM:

**Corrección de la topología de los usos de suelo.** Se llevaron a cabo ajustes topológicos para minimizar errores en la información de los usos de suelo. Esto incluyó la corrección de errores como el exceso de vértices, intersecciones incorrectas entre polígonos y otros problemas que

pudieran afectar la precisión del modelo. Esta tarea se realizó utilizando un software de Sistema de Información Geográfica (SIG).

**Figura 3.**

*Validación de topología en ArcGIS Pro.*



*Nota.* Diagrama ilustrativo que muestra el proceso de validación de topología en ArcGIS Pro, incluyendo la creación de áreas sucias durante la edición, su validación, y la identificación de errores de superposición en la topología. Tomado de Esri (Topología en ArcGIS Pro), recuperado de [esri.com](http://esri.com).

**Procesamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM).**

**Conversión de la ortofoto a formato .TIFF.** La ortofoto fue transformada en un archivo raster tipo .TIFF, compatible con los requerimientos del software InfoWorks ICM.

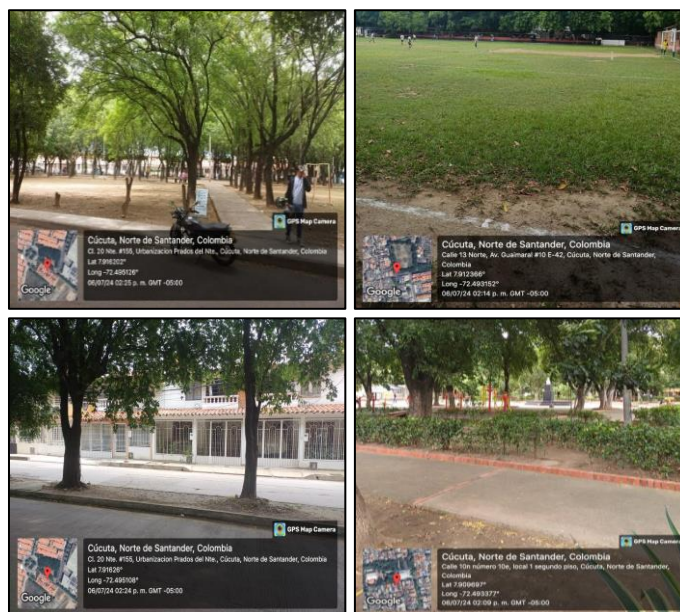
**Verificación del DEM.** Se revisó que la conversión preservara la calidad original de los datos y que los valores de elevación fueran consistentes con las características del terreno.

**Organización de los datos de la red de alcantarillado.** La red de alcantarillado se organizó y preparó, asegurando que los datos fueran compatibles con los requerimientos de InfoWorks ICM. Se realizaron revisiones exhaustivas para reducir errores potenciales en la estructura de la red antes de integrarla en el software.

**Análisis de sitio.** Se realizaron visitas de campo para validar y complementar la información recopilada, observando en situ los usos del suelo y las condiciones físicas de la red de drenaje, entre otros aspectos críticos de la zona de estudio.

**Figura 4.**

*Análisis de sitio*



*Nota.* La figura muestra varias fotografías tomadas en la zona de estudio que permiten conocer los usos de suelos.

## **2° Fase Obtención del hietograma de precipitación de diseño**

El objetivo de esta fase fue desarrollar las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), construir los hietogramas de precipitación y calcular el tiempo de concentración de la cuenca. Estos elementos representan insumos hidrológicos fundamentales para el modelo hidrodinámico, ya que permiten caracterizar con precisión los eventos de precipitación. Las curvas IDF proporcionan una relación matemática entre la intensidad, la duración y la frecuencia de las lluvias, lo que resulta esencial para identificar los eventos críticos de diseño. Por su parte, los hietogramas representan la distribución temporal de la precipitación durante un evento de lluvia, mientras que el tiempo de concentración define la respuesta hidrológica de la cuenca. Estos tres componentes, integrados al modelo, garantizan que las simulaciones reflejen con fidelidad las dinámicas del flujo en función de las condiciones reales de la zona de estudio.

### ***Organización de los Datos Pluviométricos.***

Se recopilaron y organizaron datos históricos de precipitación máxima en 24 horas (mm), proporcionados por el IDEAM, específicamente de la estación meteorológica del Aeropuerto Camilo Daza. Esta estación fue seleccionada debido a la calidad y extensión de sus registros, que abarcan más de 70 años de datos confiables.

**Selección de los datos.** Los datos se organizaron en una serie temporal para su análisis, asegurando que representaran eventos extremos relevantes para el área de estudio.

**Validación de la información.** Se realizó una revisión de los datos para identificar y corregir posibles inconsistencias, como valores atípicos o faltantes, asegurando su precisión para los cálculos posteriores.

***Desarrollo de las Curvas IDF utilizando la Distribución de Gumbel.***

Para calcular las curvas IDF, que relacionan la intensidad de la precipitación con la duración del evento y su frecuencia de ocurrencia, se empleó la distribución de Gumbel y se trabajaron los datos en Excel. A continuación, se detalla el proceso y las ecuaciones utilizadas:

**Selección de la Distribución de Gumbel:** Debido a su eficacia en el análisis de eventos extremos, como precipitaciones intensas, se utilizó la distribución de Gumbel para modelar la frecuencia de lluvias de alta intensidad en la región. Esto permite predecir la probabilidad de ocurrencia de eventos de precipitación para diferentes períodos de retorno.

La fórmula para las curvas IDF es:

**Ecuación 8**

$$I = \frac{a}{(T+c)^b}$$

donde:

- I es la intensidad de precipitación (mm/h).
- T es la duración del evento (en minutos u horas).
- **a, b, y c** son parámetros específicos de la cuenca obtenidos mediante análisis estadístico y ajustados a la distribución de Gumbel.

**Cálculo de Parámetros Específicos para Cada Tiempo de Retorno:** Utilizando los datos históricos, se calcularon valores específicos para **a**, **b**, y **c** en Excel. Cada período de retorno (2, 5, 10, 25, 50, y 100 años) tiene su propia ecuación IDF, permitiendo estimar la intensidad de precipitación esperada para cualquier duración y frecuencia de evento.

### ***Construcción de los Hietogramas de Precipitación utilizando el Método de Bloques Alternos***

Para representar la variación temporal de la precipitación durante un evento de lluvia, se desarrollaron hietogramas utilizando el **Método de Bloques Alternos**:

**Cálculo de la Intensidad para Cada Bloque:** La intensidad de precipitación se calcula utilizando la ecuación IDF derivada para cada tiempo de retorno y duración, adaptando las intensidades en bloques de tiempo alternantes.

**Método de Bloques Alternos:** Este método organiza las intensidades en bloques de igual duración, alternando las intensidades de manera decreciente desde el centro hacia los extremos del evento. Esto simula la variación de intensidad en un evento de lluvia, proporcionando un hietograma realista para cada tiempo de retorno.

**Generación de Hietogramas:** Los hietogramas se generaron en Excel, aplicando las intensidades obtenidas de las ecuaciones IDF y reflejando la distribución temporal de la precipitación. Estos hietogramas se usarán en el modelo hidrodinámico para analizar el comportamiento del flujo en respuesta a diferentes eventos de precipitación.

### ***Cálculo del Tiempo de Concentración de la Cuenca (Ecuación de California)***

Para completar la caracterización hidrológica de la cuenca, se calculó el tiempo de concentración utilizando la ecuación de California, que es especialmente útil para evaluar el

tiempo que tarda el agua en desplazarse desde el punto más lejano de la cuenca hasta su punto de salida. La ecuación es:

### **Ecuación 9**

$$T_c = 0.0195 \times \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$$

donde:

- $T_c$  es el tiempo de concentración (en minutos).
- $L$  es la longitud del flujo más largo en la cuenca (en metros).
- $S$  es la pendiente media de la cuenca (adimensional).

El valor obtenido para el tiempo de concentración es fundamental para definir la duración de los eventos de precipitación en el modelo, ya que determina el tiempo en que toda el agua de la cuenca contribuye al caudal en el punto de salida.

### **3° Fase Construcción del modelo numérico de la zona de estudio**

En esta fase, se realizó la construcción del modelo hidrodinámico detallado que captura de manera integral las dinámicas de flujo superficial bidimensional (2D) y subterráneo unidimensional (1D) presentes en la zona de estudio. Para este propósito, se utilizó el software InfoWorks ICM, una herramienta avanzada que permite integrar múltiples componentes hidráulicos e hidrológicos en un solo entorno de simulación. El modelo construido fue diseñado para representar con precisión las condiciones reales de la subcuenca, incorporando información clave recopilada y procesada en las fases previas.

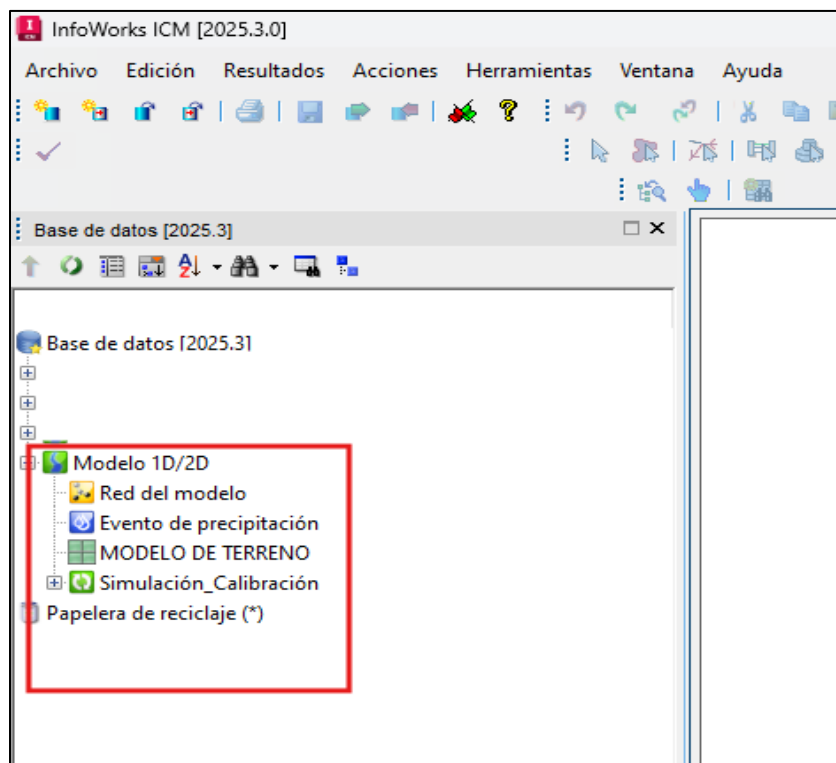
El desarrollo del modelo incluyó la representación detallada de elementos como las características del terreno, los usos del suelo, la red de drenaje subterráneo y los eventos de precipitación específicos. Cada uno de estos componentes se integró de manera sistemática para garantizar que el modelo reflejara fielmente las interacciones entre los flujos superficiales y subterráneos en escenarios de lluvia intensa.

Además, esta fase también tuvo como objetivo calibrar el modelo mediante datos observados de eventos reales, asegurando que las simulaciones realizadas fueran representativas y fiables.

### ***Creación del Espacio de Trabajo***

Se creó un **grupo de modelo** dentro de InfoWorks ICM para organizar y estructurar los elementos necesarios para el desarrollo del modelo hidrodinámico. Este grupo incluyó los siguientes componentes fundamentales:

- **Red de modelo:** Aquí se configuraron la red subterránea (1D) y la zona de escurrimiento superficial (2D).
- **Modelo de terreno:** Espacio donde se cargó el Modelo Digital de Elevación (DEM) que representa la topografía de la zona de estudio.
- **Evento de precipitación:** Este archivo se configuró para introducir un evento de lluvia destinado a la calibración del modelo hidrodinámico.
- **Simulación:** Archivo donde se controlaron los parámetros necesarios para ejecutar el modelo y analizar los resultados.
-

**Figura 5.***Espacio de trabajo*

*Nota.* La figura muestra el espacio de trabajo donde se desarrolla el modelo hidrodinámico

### ***Configuración de la Red de Modelo***

Una vez creado el espacio de trabajo, se procedió a importar los archivos necesarios para configurar la red de modelo. Los pasos seguidos fueron los siguientes:

#### **Importación de la zona 2D**

- **Propiedades asignadas:**
  - **Tamaño de malla:** Se configuró un tamaño máximo de **10 metros** y un tamaño mínimo de **2 metros**, asegurando un nivel adecuado de detalle en zonas críticas.

- **Tipo de malla:** Se utilizó **ClipMeshing**, una técnica de mallado que optimiza la resolución en áreas complejas al ajustar automáticamente la densidad de la malla según las características topográficas de la zona.

**Condición de contorno.** Se configuró con un tipo de contorno **Normal Condition**, que permite el intercambio de flujo en los límites del modelo de manera estándar, asegurando que las entradas y salidas reflejen condiciones reales.

**Zona de malla.** Se realizaron modificaciones en el nivel del terreno mediante la herramienta **Raise or Lower**, que ajusta la elevación del modelo para reflejar las características topográficas específicas.

**Capa de rugosidad e infiltración.** Se cargaron los usos del suelo, asignando coeficientes de rugosidad e infiltración específicos para cada tipo de superficie:

- **Tejido urbano:** Baja infiltración, rugosidad reducida.
- **Áreas verdes y vegetación:** Alta infiltración, rugosidad elevada.
- **Vías:** Sin infiltración, rugosidad intermedia.

### **Importación de la red 1D**

**Nodos de la red 1D.** Se importaron los nodos correspondientes a los pozos (manholes) y las salidas (outfalls), configurando sus cotas y profundidades.

**Conductos de la red 1D.** Se cargaron los conductos de la red subterránea, considerando tanto el tipo de material (concreto, PVC, etc.) como la sección transversal de los mismos.

**Configuración del Modelo de Terreno.** En el modelo de terreno, se integró el Modelo Digital de Elevación (DEM) de la zona de estudio, proporcionando una base topográfica precisa que refleja las pendientes y rutas de flujo en el área.

**Configuración del Evento de Precipitación.** Se cargó un evento de precipitación basado en un tiempo de retorno específico, diseñado para calibrar el modelo hidrodinámico. Este evento incluye un hietograma que describe la distribución temporal de la intensidad de lluvia durante el evento.

### ***Simulación del Modelo y Criterios de Calibración***

Una vez construido el modelo computacional en InfoWorks ICM, se procedió a la calibración para verificar que el sistema urbano de drenaje representara correctamente su comportamiento hidráulico. Este proceso fue realizado utilizando datos obtenidos del proyecto investigativo titulado "*Cuantificación de la Peligrosidad en Peatones por Inundaciones de Origen Pluvial en Cuencas Urbanas Usando Lenguaje de Programación Python y el Modelo Avanzado de Gestión de Aguas Pluviales (PCSWMM)*".

### ***Proceso de Calibración***

**Uso de Datos Observados.** Los datos de caudales observados y simulados, proporcionados por el proyecto previo, fueron fundamentales para establecer la comparación necesaria en la calibración. Estos datos incluyeron mediciones específicas de flujo en puntos estratégicos del sistema de drenaje urbano durante eventos de lluvia.

**Parámetros Ajustados.** Durante la calibración, se realizaron ajustes en los siguientes parámetros:

**Coeficientes de Rugosidad.** Se ajustaron los valores asignados a las diferentes coberturas del suelo (techo urbano, vías, vegetación, áreas verdes) para reflejar mejor las condiciones reales del terreno.

**Coeficientes de Escorrentía.** Se optimizaron los valores que representan la capacidad de las diferentes superficies para generar flujo superficial tras la precipitación, asegurando que el modelo reprodujera de manera precisa los volúmenes de agua observados.

**Método de Evaluación.** Se utilizó el **Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)** como criterio principal para evaluar la precisión del modelo. Este coeficiente mide la concordancia entre los datos simulados y los observados. La ecuación utilizada fue:

**Ecuación 10**

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

- $Q_{obs,i}$ : Caudal observado en el tiempo i
- $Q_{sim,i}$ : Caudal simulado en el tiempo i
- $Q_{obs}$ : Caudal promedio observado.

**Tabla 3.**

*Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe*

| NSE       | AJUSTE        |
|-----------|---------------|
| < 0.2     | Insuficiente  |
| 0.2 - 0.4 | Satisfactorio |
| 0.4 - 0.6 | Bueno         |
| 0.6 - 0.8 | Muy bueno     |
| > 0.8     | Excelente     |

*Nota.* La tabla fue tomada de Molnar, P. (2011).

**Iteración del Modelo.** Se realizaron ajustes iterativos de los parámetros de rugosidad y escorrentía en las diferentes capas del modelo hasta alcanzar un valor aceptable del NSE. Esto aseguró que las simulaciones reprodujeran con fidelidad las condiciones reales observadas en el sistema de drenaje.

#### **4° Fase Análisis del modelo hidrodinámico del sistema de drenaje**

En esta fase, se realizó un análisis detallado y exhaustivo de las dinámicas de inundación y las velocidades de flujo simuladas en el modelo hidrodinámico desarrollado en InfoWorks ICM. Este análisis tuvo como propósito principal evaluar el desempeño del sistema de drenaje urbano integrado (1D/2D) bajo diversos escenarios de lluvia asociados a tiempos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. La incorporación de estas simulaciones permitió examinar cómo responden las infraestructuras de drenaje, tanto subterráneas como superficiales, frente a eventos de precipitación de diferentes magnitudes e intensidades.

Esta evaluación no solo se centró en identificar áreas vulnerables a inundaciones, sino también en analizar las velocidades del flujo, dado que estas representan un factor crítico para la seguridad de los peatones, vehículos y estructuras urbanas. La fase incluyó el análisis de profundidades máximas alcanzadas en la superficie, la capacidad de la red subterránea para manejar los volúmenes de agua generados y las transferencias de flujo entre los sistemas 1D y 2D.

#### ***Simulación de Escenarios Hidrodinámicos***

El primer paso consistió en configurar las simulaciones correspondientes a los tiempos de retorno seleccionados. Los hietogramas obtenidos previamente, con base en las curvas IDF

calculadas en la fase dos, se incorporaron al modelo calibrado. Cada escenario se simuló de manera independiente, manteniendo los parámetros hidráulicos, como el paso de tiempo y las condiciones de contorno, definidos durante la calibración. Estas simulaciones permitieron observar el comportamiento del flujo tanto en la superficie como en la red subterránea.

### ***Evaluación de la Zona Superficial (2D)***

En cuanto a la zona superficial (2D), se analizó el comportamiento del flujo para identificar las dinámicas de inundación. Se evaluaron las profundidades máximas alcanzadas en diferentes áreas del modelo, generando mapas que muestran las zonas más afectadas por acumulaciones de agua. Asimismo, se estudió la distribución espacial de las velocidades del flujo, destacando aquellas áreas donde las velocidades podrían representar riesgos significativos para peatones y vehículos. Los mapas obtenidos para cada tiempo de retorno proporcionaron una visión clara de los patrones de inundación y las velocidades asociadas.

### ***Evaluación de la Red Subterránea (1D)***

Por otro lado, la red subterránea (1D) fue analizada para determinar su capacidad de manejar los volúmenes de agua generados en los escenarios de lluvia simulados. Se examinó la funcionalidad de los conductos subterráneos, identificando puntos críticos donde el sistema mostró insuficiencia hidráulica. Estas insuficiencias provocaron desbordamientos hacia la superficie, lo que destacó la necesidad de estudiar la interacción entre los sistemas 1D y 2D.

### ***Interacción entre Sistemas 1D y 2D***

La interacción entre los sistemas subterráneo y superficial fue un componente clave del análisis. Se evaluaron las transferencias de flujo entre ambos sistemas, identificando las zonas

donde la red subterránea no pudo contener el flujo, generando desbordamientos hacia la superficie. También se analizó cómo las inundaciones superficiales afectaron la operatividad del sistema subterráneo, resaltando la importancia de una adecuada coordinación entre ambos componentes para la mitigación de inundaciones.

## **Resultados**

Los resultados de la investigación se presentarán de la misma forma que la metodología, constando de cuatro fases, y en cada una de ellas se describirán las actividades propuestas para el cumplimiento de las mismas.

### **1° Fase**

#### ***Delimitación de la Zona 2D de Estudio***

El primer resultado de esta fase corresponde a la delimitación de la zona 2D de estudio, ilustrada en la Figura 8. Este resultado define los límites geográficos de la subcuenca urbana seleccionada, identificando con precisión el área en la que se aplicará el modelo hidrodinámico 1D/2D. Esta delimitación es clave para enfocar el análisis en las zonas urbanas que presentan mayores riesgos de inundación, permitiendo una evaluación más detallada y específica.

El proceso de delimitación se realizó utilizando datos de un Modelo Digital de Elevación (DEM) procesado en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Esta etapa implicó la identificación de los límites de la cuenca y los puntos de aporte y descarga del flujo superficial. Asimismo, se destacaron características relevantes como las áreas urbanizadas, las principales vías de drenaje y zonas de vegetación. Esta información asegura que las simulaciones consideren con



## **2. Red de Alcantarillado (Modelo 1D)**

El segundo resultado corresponde a la identificación y organización de la red de alcantarillado en la zona de estudio, representada en la **Figura 9**. En esta figura se observa la red de drenaje subterráneo, que constituye el modelo 1D de alcantarillado para el análisis hidrodinámico. La red incluye los siguientes componentes principales:

**Pozos (Manholes):** Representan los puntos de acceso a la red de alcantarillado, distribuidos en distintos sectores de la zona de estudio. Los pozos son elementos clave para la ventilación y el mantenimiento de la red, además de funcionar como puntos de control de flujo.

**Conductos:** Estos elementos conectan los pozos y transportan el agua a lo largo de la red. La red de alcantarillado incluye diversos tipos de conductos según el material y la sección, como se detalla a continuación:

**Materiales:** Los conductos se construyen con distintos materiales, incluyendo concreto, gres y PVC, seleccionados de acuerdo con las especificaciones y condiciones de durabilidad requeridas en cada tramo.

**Tipos de sección:** Los conductos presentan diferentes secciones, incluyendo:

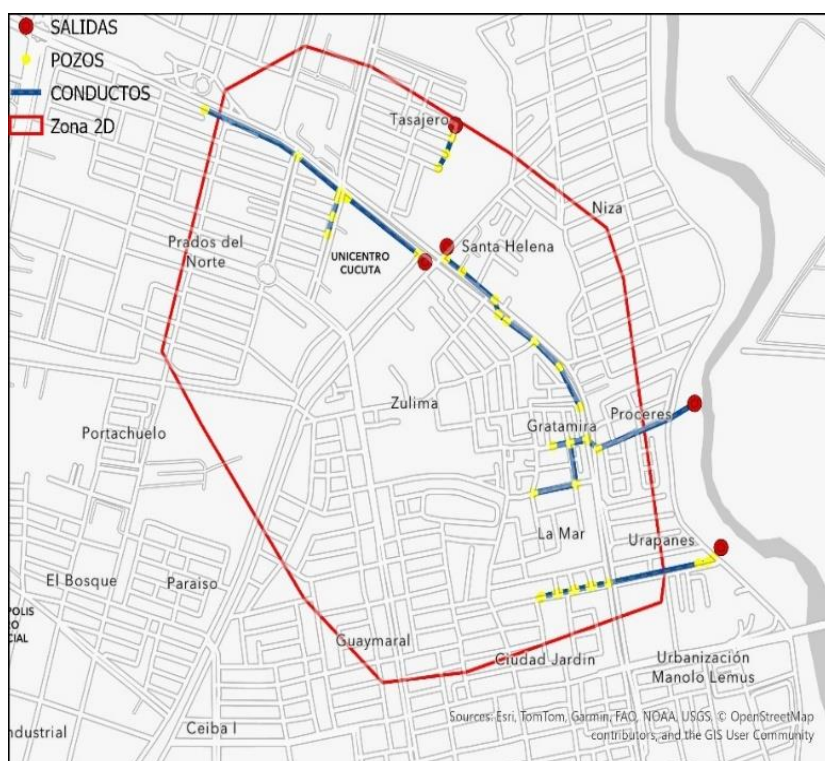
- **Circular**
- **Rectangular cerrado**
- **Rectangular abierto**

**Salidas (Outfalls):** Estos son los puntos de descarga de la red, donde el agua de drenaje es liberada hacia el entorno exterior, como cuerpos de agua o áreas de descarga controlada. Los

outfalls son esenciales para entender el comportamiento del flujo en los extremos de la red de alcantarillado.

**Figura 7.**

*Red de Alcantarillado (Modelo 1D)*



*Nota.* La figura muestra el trazado de la Red de Alcantarillado (Modelo 1D)

### 3. Usos del Suelo

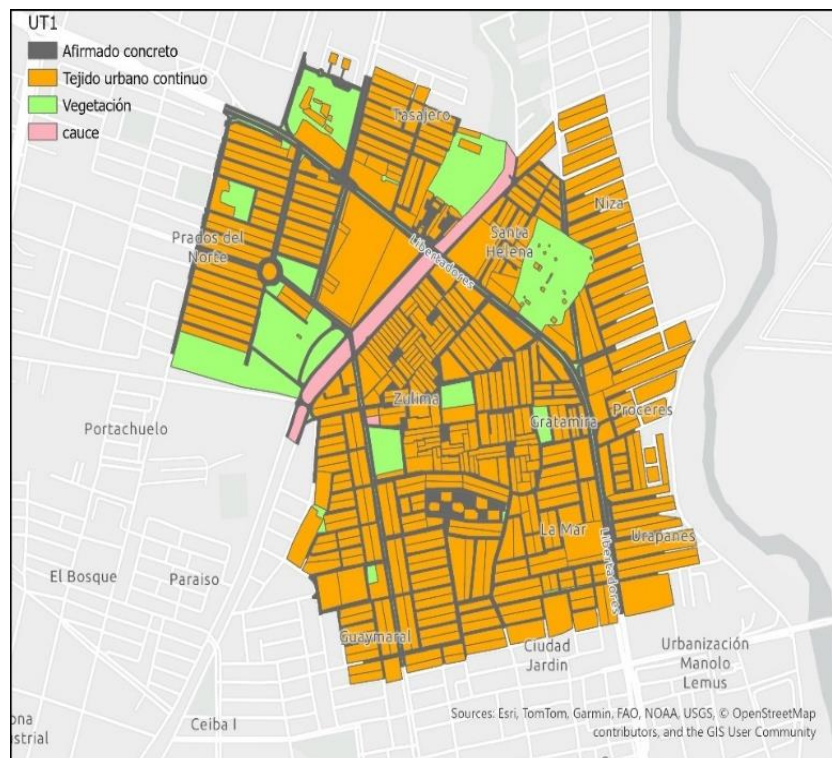
La **Figura 8** muestra el mapa de los usos de suelo en la zona de estudio, clasificando las diferentes superficies y sus porcentajes de ocupación en el área total de 139 hectáreas. Esta clasificación es esencial para definir los coeficientes de rugosidad y las condiciones de escorrentía

en el modelo, permitiendo un cálculo preciso del flujo superficial en respuesta a las precipitaciones. Los usos de suelo se detallan a continuación:

- **Afirmado de concreto**
- **Tejido urbano continuo**
- **Vegetación**

Además, se desglosan los siguientes componentes de uso de suelo en porcentajes del área total:

- **Áreas permeables:** Constituyen únicamente el 13% del área total, incluyendo parques, jardines y espacios verdes. Su baja proporción limita significativamente la capacidad del terreno para absorber el agua de lluvia, lo que contribuye al aumento del escurrimiento superficial y a una menor regulación natural del agua en la zona.
- **Vías:** Las calles y avenidas ocupan el 25% del área total y, al estar pavimentadas con materiales impermeables, favorecen el escurrimiento rápido hacia zonas bajas y sistemas de drenaje, aumentando las velocidades del flujo y el riesgo de inundaciones en las zonas críticas.
- **Cubiertas:** Los techos de viviendas y edificaciones ocupan el 62% del área total, siendo el uso del suelo predominante. Estas superficies generan altos volúmenes de escurrimiento al no permitir la infiltración,

**Figura 8.***Usos del Suelo*

Nota. La figuras muestra los distintos Usos del Suelo presentes en la zona de estudio.

#### **4. Modelo Digital de Elevación (DEM)**

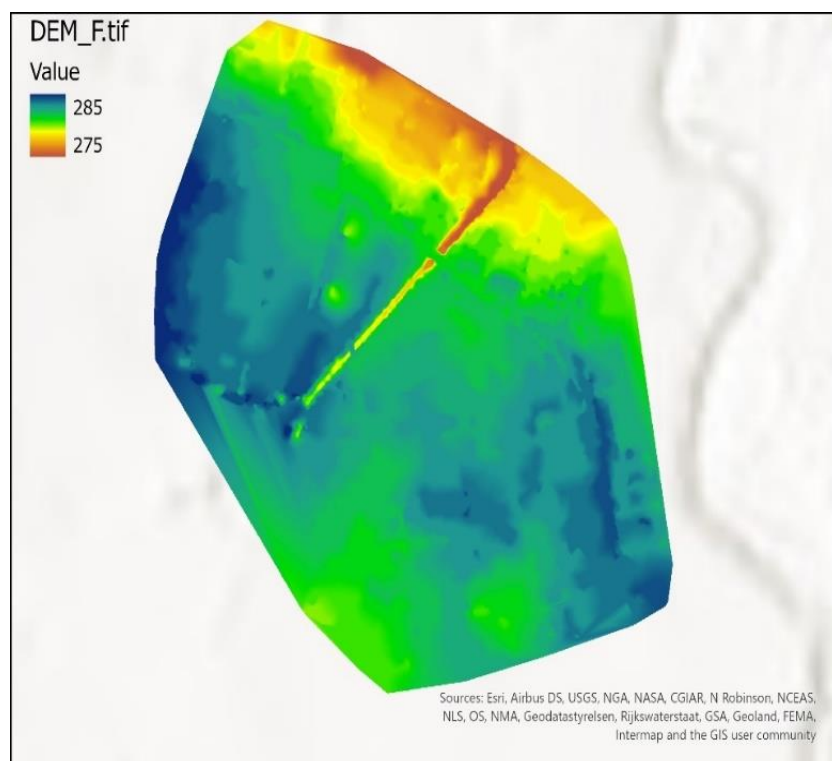
El cuarto resultado es el Modelo Digital de Elevación (DEM) de la zona de estudio, ilustrado en la **Figura 11**. Este modelo fue generado a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) descargado del satélite ALOS PALSAR, propiedad de la agencia japonesa de exploración aeroespacial (JAXA). Este MDE, con una resolución de 12.5 m, fue seleccionado debido a su alta precisión y a la estabilidad de las condiciones del terreno desde los años 2011 a 2021, corroborada mediante imágenes satelitales en Google Earth. Además, este insumo fue proporcionado por la

investigación "Cuantificación de la Peligrosidad en Peatones por Inundaciones de Origen Pluvial en Cuencas Urbanas Usando Lenguaje de Programación Python y el Modelo Avanzado de Gestión de Aguas Pluviales (PCSWMM)", adaptándose al propósito del presente estudio.

El MDE obtenido fue transformado directamente en un archivo ráster en formato .tiff, lo que facilitó su integración al software InfoWorks ICM. Este proceso garantizó que el modelo digital reflejara con precisión las elevaciones del terreno, sirviendo como base topográfica esencial para las simulaciones hidrodinámicas y los análisis posteriores del sistema de drenaje urbano.

**Figura 9.**

*Modelo Digital de Elevación (DEM)*



*Nota.* La figura muestra el Modelo Digital de Elevación (DEM)

### 5. Datos de Precipitación de la Estación Meteorológica

Por último, se obtuvieron los datos de precipitación de la estación meteorológica del aeropuerto Camilo Daza, proporcionados por el IDEAM. Estos datos, que incluyen registros de precipitación máxima de 24 horas serán utilizados en fases posteriores para construir el hietograma de precipitación y simular eventos de lluvia en el modelo hidrodinámico.

**Tabla 4.**

*Valores de Precipitación Máximas (24 hrs) Mensuales*

| <b>Año</b> | <b>Máximo (mm)</b> | <b>Año</b> | <b>Máximo(mm)</b> |
|------------|--------------------|------------|-------------------|
| 1970       | 61                 | 1995       | 55                |
| 1971       | 64.4               | 1996       | 50.7              |
| 1972       | 101                | 1997       | 42                |
| 1973       | 95.2               | 1998       | 69                |
| 1974       | 76                 | 1999       | 115.4             |
| 1975       | 94.2               | 2000       | 82.6              |
| 1976       | 54.7               | 2001       | 53.1              |
| 1977       | 43.2               | 2002       | 118.1             |
| 1978       | 74.6               | 2003       | 84.6              |
| 1979       | 83.7               | 2004       | 106.9             |
| 1980       | 65                 | 2005       | 99.6              |
| 1981       | 73.7               | 2006       | 73.9              |
| 1982       | 54.6               | 2007       | 94.7              |
| 1983       | 54.5               | 2008       | 61.4              |
| 1984       | 58                 | 2009       | 61                |
| 1985       | 98.7               | 2010       | 168.4             |
| 1986       | 72.3               | 2011       | 93.2              |
| 1987       | 97.7               | 2012       | 96                |
| 1988       | 95.5               | 2013       | 79.6              |
| 1989       | 80                 | 2014       | 72.3              |
| 1990       | 91.6               | 2015       | 55                |
| 1991       | 50.2               | 2019       | 54.51             |
| 1992       | 62                 | 2020       | 59.1              |
| 1993       | 48.8               | 2021       | 29.6              |
| 1994       | 65.3               | <b>MAX</b> | <b>168.4</b>      |

## 2° Fase

### 1. Curvas IDF

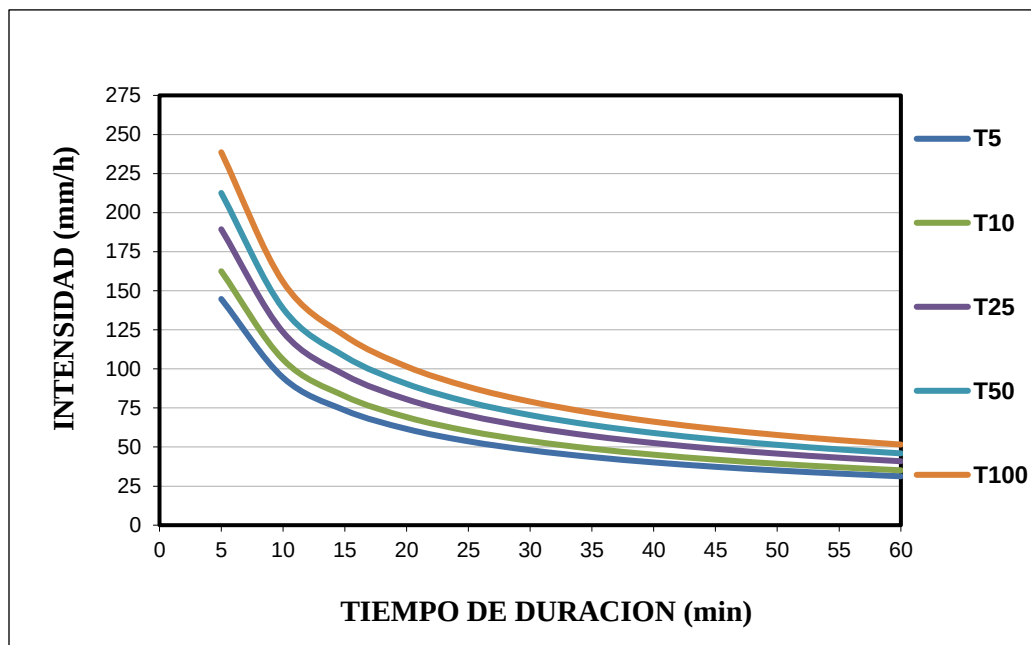
Se generaron las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) utilizando los datos de precipitación máxima en 24 horas, ajustados mediante la distribución de Gumbel, para un tiempo de duración de 60 minutos. Estas curvas permiten relacionar la intensidad de precipitación con el tiempo de retorno y constituyen una herramienta fundamental para el diseño de sistemas de drenaje.

**Tabla 5.**

*Tabla de Intensidades*

| Tabla de intensidades - Tiempo de duración |                     |        |        |        |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Frecuencia                                 | Duración en minutos |        |        |        |       |       |       |       |       |       |       |       |
| años                                       | 5                   | 10     | 15     | 20     | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    | 55    | 60    |
| 5                                          | 144.73              | 94.41  | 73.53  | 61.58  | 53.67 | 47.96 | 43.62 | 40.17 | 37.36 | 35.01 | 33.01 | 31.29 |
| 10                                         | 162.48              | 105.99 | 82.55  | 69.14  | 60.25 | 53.85 | 48.97 | 45.10 | 41.94 | 39.30 | 37.06 | 35.12 |
| 25                                         | 189.33              | 123.50 | 96.19  | 80.56  | 70.21 | 62.74 | 57.06 | 52.55 | 48.87 | 45.80 | 43.18 | 40.93 |
| 50                                         | 212.55              | 138.65 | 107.99 | 90.44  | 78.82 | 70.44 | 64.05 | 58.99 | 54.86 | 51.41 | 48.48 | 45.95 |
| 100                                        | 238.62              | 155.65 | 121.23 | 101.53 | 88.48 | 79.08 | 71.91 | 66.23 | 61.59 | 57.72 | 54.43 | 51.58 |

*Nota.* La Tabla muestra los valores de intensidad de precipitación correspondientes a diferentes períodos de retorno (5, 10, 25, 50, 100, y 500 años) para una duración de 60 minutos.

**Figura 10.***Gráfica de las Curvas IDF*

*Nota.* La Figura presenta la gráfica de las curvas IDF, donde se observa la relación entre la intensidad de precipitación y el tiempo de retorno.

## **2. Cálculo del Tiempo de Concentración de la Cuenca**

El tiempo de concentración de la cuenca se calculó utilizando la **Ecuación de California**. **Ecuación 9**, una fórmula comúnmente empleada en análisis hidrológicos para estimar el tiempo que tarda el agua en desplazarse desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida. Este valor es esencial para definir la duración de los eventos de precipitación en los hietogramas.

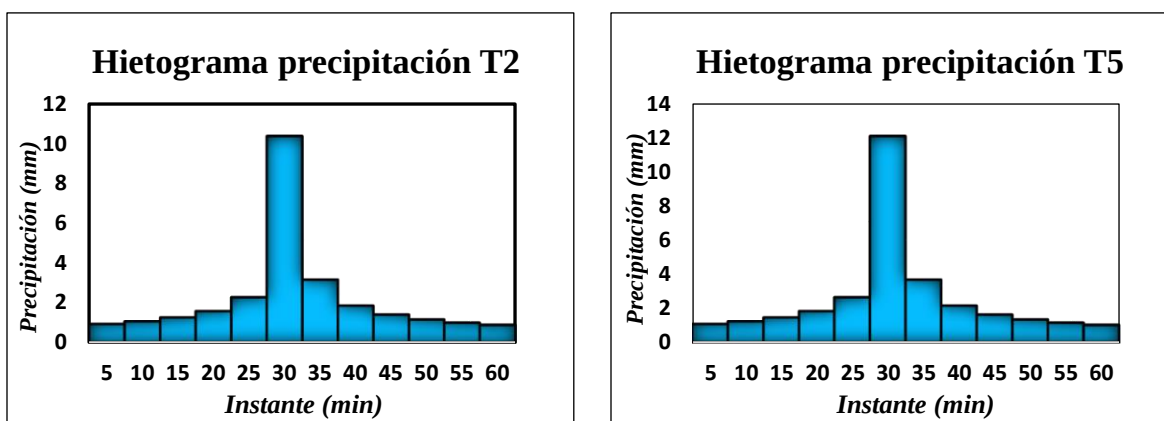
La ecuación utilizada es:

$$T_c = 0.0195 \times \left( \frac{2000}{\sqrt{0.05}} \right)^{0.77} = 0.36$$

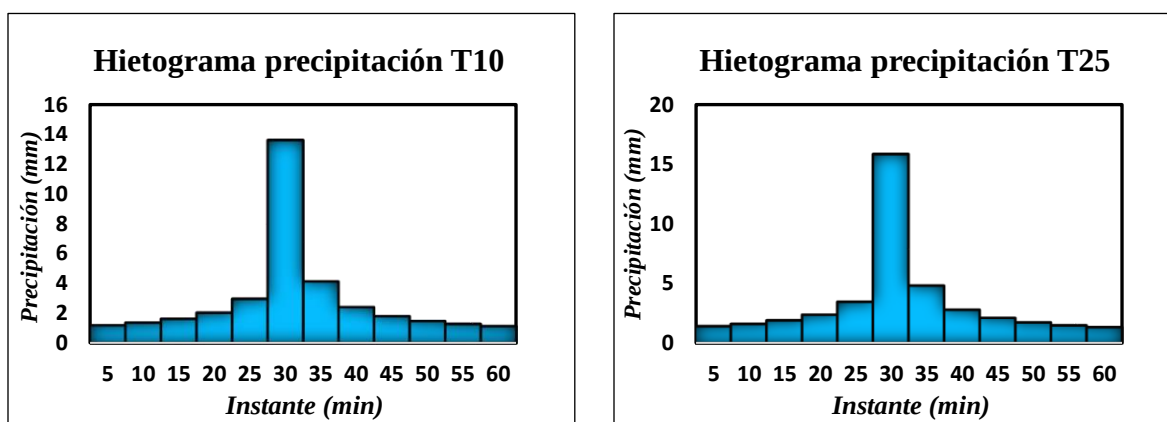
### **3. Hietogramas de Precipitación por Tiempo de Retorno**

Se generaron hietogramas de precipitación mediante el método de Bloques Alternos para diferentes tiempos de retorno, representando la distribución temporal de la intensidad de lluvia durante eventos de 60 minutos. Los resultados mostraron que, para un tiempo de retorno de 2 años (TR2), la intensidad máxima alcanzada fue de 12 mm/h, concentrada en el minuto 30, mientras que para un tiempo de retorno de 5 años (TR5), esta intensidad aumentó a 14 mm/h. De manera similar, los eventos más extremos presentaron incrementos significativos, como en el caso del tiempo de retorno de 10 años (TR10), donde se alcanzaron 16 mm/h, y en el tiempo de retorno de 25 años (TR25), con una intensidad máxima de 20 mm/h. Por su parte, los eventos de mayor severidad, correspondientes a tiempos de retorno de 50 años (TR50) y 100 años (TR100), mostraron intensidades máximas de 22 mm/h y 25 mm/h, respectivamente, todas concentradas alrededor del minuto 30 del evento. Este análisis resalta cómo las intensidades de precipitación aumentan de forma significativa con la magnitud del evento, proporcionando información clave para entender las dinámicas de escurrimiento y evaluar la capacidad del sistema de drenaje urbano en escenarios de lluvia extrema, lo que resulta esencial para la planificación y mitigación de riesgos de inundación.

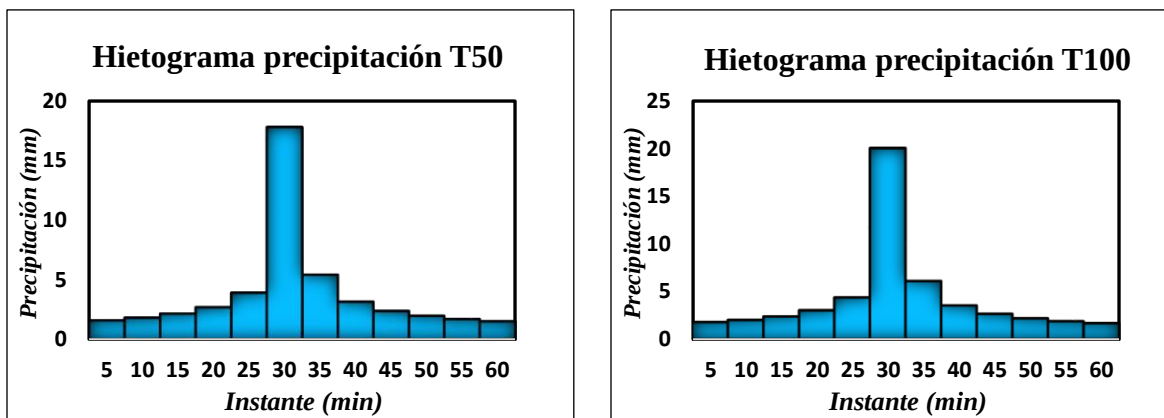
A continuación, se presentan los resultados en forma de gráficas para cada período de retorno:

**Figura 11.***Hietograma de precipitación T2 & T5*

*Nota.* La grafica muestra los hietogramas de precipitación Para un tiempo de 2 y 5 años

**Figura 12.***Hietograma de precipitación T10 & T25*

*Nota.* La grafica muestra los hietogramas de precipitación Para un tiempo de 10 y 25 años

**Figura 13.***Hietograma de precipitación T50 & T100*

*Nota.* La grafica muestra los hietogramas de precipitación Para un tiempo de 50 y 100 años

### 3° Fase

#### *Zona Superficial (2D)*

##### **Condición de contorno.**

Se configuró una condición de contorno del tipo Normal Condition, la cual establece un intercambio de flujo en los límites del modelo bajo condiciones estándar. Este tipo de condición asegura que las entradas y salidas del sistema reflejen comportamientos hidrodinámicos reales, permitiendo que el flujo pueda interactuar de manera continua y precisa con el entorno del área de estudio. Este enfoque es fundamental para garantizar que el modelo hidrodinámico simule adecuadamente las dinámicas del agua en zonas urbanas, tanto en términos de escurrimientos superficiales como de flujos subterráneos, proporcionando resultados confiables para el análisis de inundaciones y diseño de infraestructuras de drenaje.

**Figura 14.**

*Condición de contorno*



*Nota.* La figura muestra la condición de contorno creada para el modelo

**Capa de rugosidad e infiltración.** Se incorporaron las capas correspondientes a los usos del suelo en el modelo, asignando valores específicos de rugosidad e infiltración para cada tipo de superficie presente en la zona de estudio. Estos coeficientes son fundamentales para representar con precisión las interacciones entre el agua de lluvia y el terreno, ya que influyen directamente en la velocidad y volumen de escorrentía generada. Por ejemplo, superficies como el tejido urbano y las vías se caracterizan por una baja capacidad de infiltración y coeficientes de rugosidad reducidos, mientras que áreas verdes y zonas con vegetación presentan una alta infiltración y mayores niveles de rugosidad.

**Figura 15.**

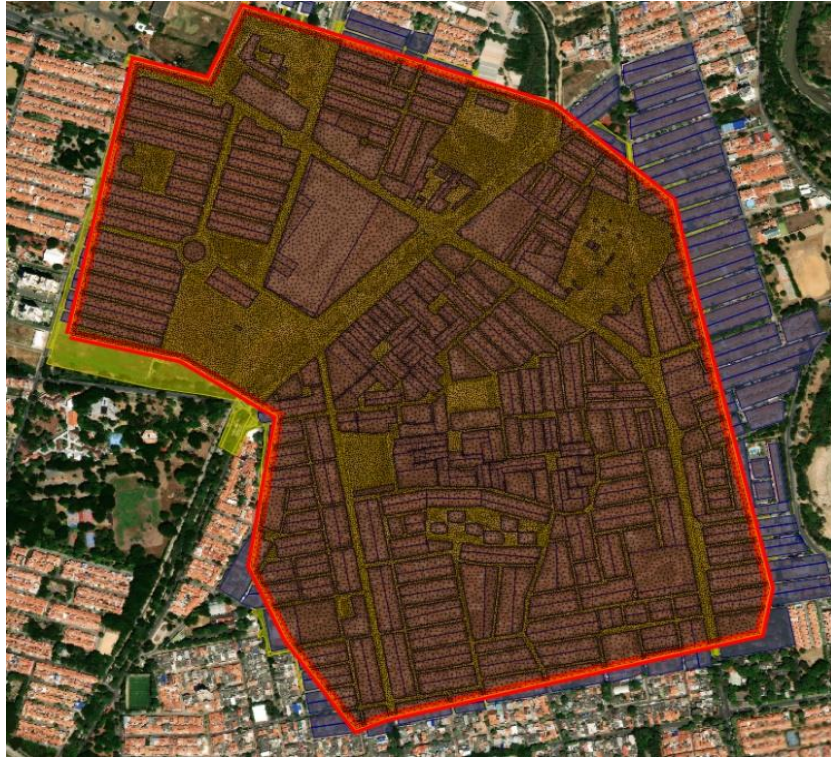
*Capa de rugosidad e infiltración*



**Zona de malla.** Se realizaron ajustes en las elevaciones del terreno utilizando la herramienta Raise or Lower, permitiendo una representación más precisa del modelo. Este procedimiento fue clave para adaptar el modelo a las características topográficas específicas del área de estudio, asegurando que las variaciones en el relieve se reflejen de manera fiel y mejorando la calidad del análisis hidrodinámico.

**Figura 16.**

*Zona de malla*



**Generación de Malla.** La generación de la malla para la representación de la zona 2D se realizó utilizando el método **ClipMeshing**, que permite ajustar dinámicamente el tamaño de las celdas en función de las características del terreno y las áreas de interés, asegurando un equilibrio entre precisión y eficiencia computacional.

En zonas de mayor relevancia hidráulica, como **vías principales y áreas permeables** (por ejemplo, parques y zonas verdes), se configuró un tamaño de celda mínimo de **2 metros**. Esta alta resolución permite capturar con mayor precisión las dinámicas de flujo, como velocidades y acumulaciones de agua, que pueden ser críticas para el análisis del comportamiento del sistema de drenaje. Por el contrario, en áreas menos sensibles desde el punto de vista hidráulico, como

sectores de topografía homogénea o regiones alejadas de las principales rutas de esorrentía, se definió un tamaño de celda máximo de **10 metros**. Esto garantiza una representación adecuada del modelo sin generar una carga computacional innecesaria.

La combinación de estas configuraciones asegura una representación precisa de los patrones de esorrentía y acumulación de agua en toda la zona de estudio, maximizando la eficiencia del modelo hidrodinámico y facilitando el análisis detallado de las interacciones entre las zonas urbanas y naturales dentro de la subcuenca.

**Figura 17.**

*Tamaño y tipo de malla*



*Nota.* La figura muestra el tipo de malla generada para el modelo

### ***Red Subterránea (1D)***

**Pozos (Manholes).** La red subterránea incluye 39 pozos, configurados con sus cotas y profundidades específicas para garantizar una representación precisa del sistema de drenaje.

**Outfalls (Salidas).** Se modelaron 5 salidas, que corresponden a los puntos de descarga del sistema.

**Conductos.** Se incorporaron 39 tramos de conductos, diseñados con propiedades específicas según el material (concreto, PVC) y la geometría (circular y rectangular).

**Figura 18.**

*Red Subterránea (1D)*



*Nota.* la figura muestra el esquema de la red 1D con los pozos, outfalls y conductos.

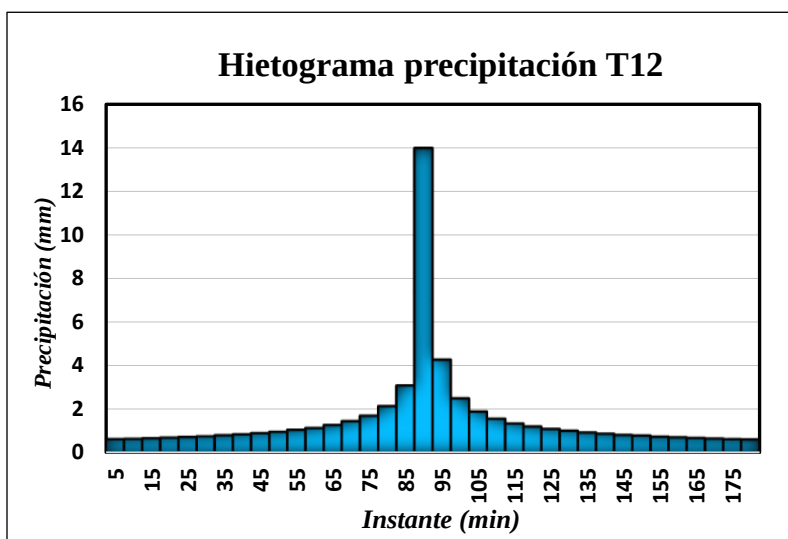
### ***Evento de Lluvia de Calibración***

Fecha del evento: 06 de noviembre de 2020.

**Tiempo de retorno (TR):** El evento de lluvia utilizado para calibrar el modelo corresponde a un **TR de 12 años**, diseñado con base en las curvas IDF obtenidas previamente.

**Figura 19.**

*Hietograma de precipitación Tr12*



### ***Calibración del Modelo***

**Criterio de calibración:** Se empleó el **Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE)** para evaluar la precisión del modelo. Este criterio permitió verificar la concordancia entre los datos observados y simulados, asegurando que el comportamiento hidrodinámico reflejara las condiciones reales.

**Datos utilizados:** Para fines de calibración del modelo, se obtuvieron datos observados de la tesis de maestría "Cuantificación de la Peligrosidad en Peatones por Inundaciones de Origen Pluvial en Cuencas Urbanas Usando Lenguaje de Programación Python y el Modelo de Gestión

de Aguas Pluviales (SWMM)" Tapiero, D. I. S. (2021), los cuales fueron medidos en la avenida Guaimaral, como se muestra en la figura 16 donde se encontraba situada la cámara con la que se realizó la medición.

### **Figura 20**

*Medición de datos para calibración*



*Nota.* La figura fue tomada de la tesis de maestría "Cuantificación de la Peligrosidad en Peatones por Inundaciones de Origen Pluvial en Cuencas Urbanas Usando Lenguaje de Programación Python y el Modelo de Gestión de Aguas Pluviales (SWMM)" Tapiero, D. I. S. (2021)

**Tabla 6.**

*Cálculo del coeficiente Nash y Sutcliffe para calibrar el modelo realizado.*

| Hora     | Calado observado (m) | Calado calculado (m) | Hora     | Calado observado (m) | Calado calculado (m) |
|----------|----------------------|----------------------|----------|----------------------|----------------------|
| 19:00:00 | 0.000                | 0                    | 20:40:00 | 0.055                | 0.062                |
| 19:05:00 | 0.000                | 0                    | 20:45:00 | 0.053                | 0.049                |
| 19:10:00 | 0.000                | 0                    | 20:50:00 | 0.047                | 0.04                 |
| 19:15:00 | 0.000                | 0.001                | 20:55:00 | 0.044                | 0.042                |
| 19:20:00 | 0.000                | 0.001                | 21:00:00 | 0.042                | 0.039                |
| 19:25:00 | 0.000                | 0.008                | 21:05:00 | 0.040                | 0.038                |
| 19:30:00 | 0.000                | 0.009                | 21:10:00 | 0.038                | 0.037                |
| 19:35:00 | 0.014                | 0.012                | 21:15:00 | 0.036                | 0.036                |
| 19:40:00 | 0.024                | 0.013                | 21:20:00 | 0.033                | 0.035                |
| 19:45:00 | 0.018                | 0.014                | 21:25:00 | 0.032                | 0.034                |
| 19:50:00 | 0.020                | 0.016                | 21:30:00 | 0.030                | 0.033                |
| 19:55:00 | 0.031                | 0.017                | 21:35:00 | 0.029                | 0.032                |
| 20:00:00 | 0.033                | 0.022                | 21:40:00 | 0.028                | 0.031                |
| 20:05:00 | 0.034                | 0.023                | 21:45:00 | 0.027                | 0.03                 |
| 20:10:00 | 0.034                | 0.033                | 21:50:00 | 0.027                | 0.029                |
| 20:15:00 | 0.034                | 0.025                | 21:55:00 | 0.027                | 0.028                |
| 20:20:00 | 0.038                | 0.019                | 22:00:00 | 0.026                | 0.027                |
| 20:25:00 | 0.045                | 0.038                | 22:05:00 | 0.026                | 0.024                |
| 20:30:00 | 0.052                | 0.042                | 22:10:00 | 0.025                | 0.023                |
| 20:35:00 | 0.055                | 0.05                 | 22:15:00 | 0.024                | 0.022                |
|          |                      |                      |          | <b>NSE</b>           | <b>0.849</b>         |

*Nota.* El valor de 0.849 obtenido para el NSE indica que el modelo hidrodinámico desarrollado reproduce de manera adecuada las condiciones reales observadas

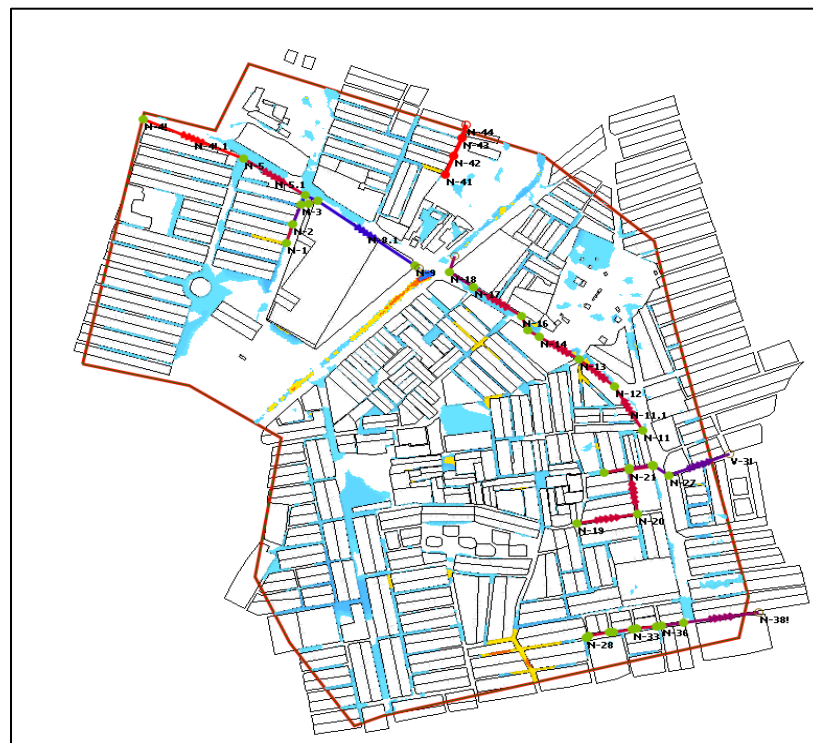
El criterio de Nash-Sutcliffe (NSE) obtenido para este estudio fue de 0.849, un valor que, de acuerdo con la literatura técnica (Molnar, 2011), corresponde a una clasificación de "Excelente". Esto indica que el modelo hidrodinámico presenta un ajuste muy alto entre los datos observados y los simulados, validando su precisión y confiabilidad.

### **Modelo Hidrodinámico**

El modelo integró satisfactoriamente las dinámicas entre el flujo superficial (zona 2D) y el sistema de drenaje subsuperficial (zona 1D), permitiendo identificar puntos críticos

### Figura 21

### Modelo Hidrodinámico.



*Nota.* La figura muestra el modelo hidrodinámico de la zona de estudio

#### 4º Fase

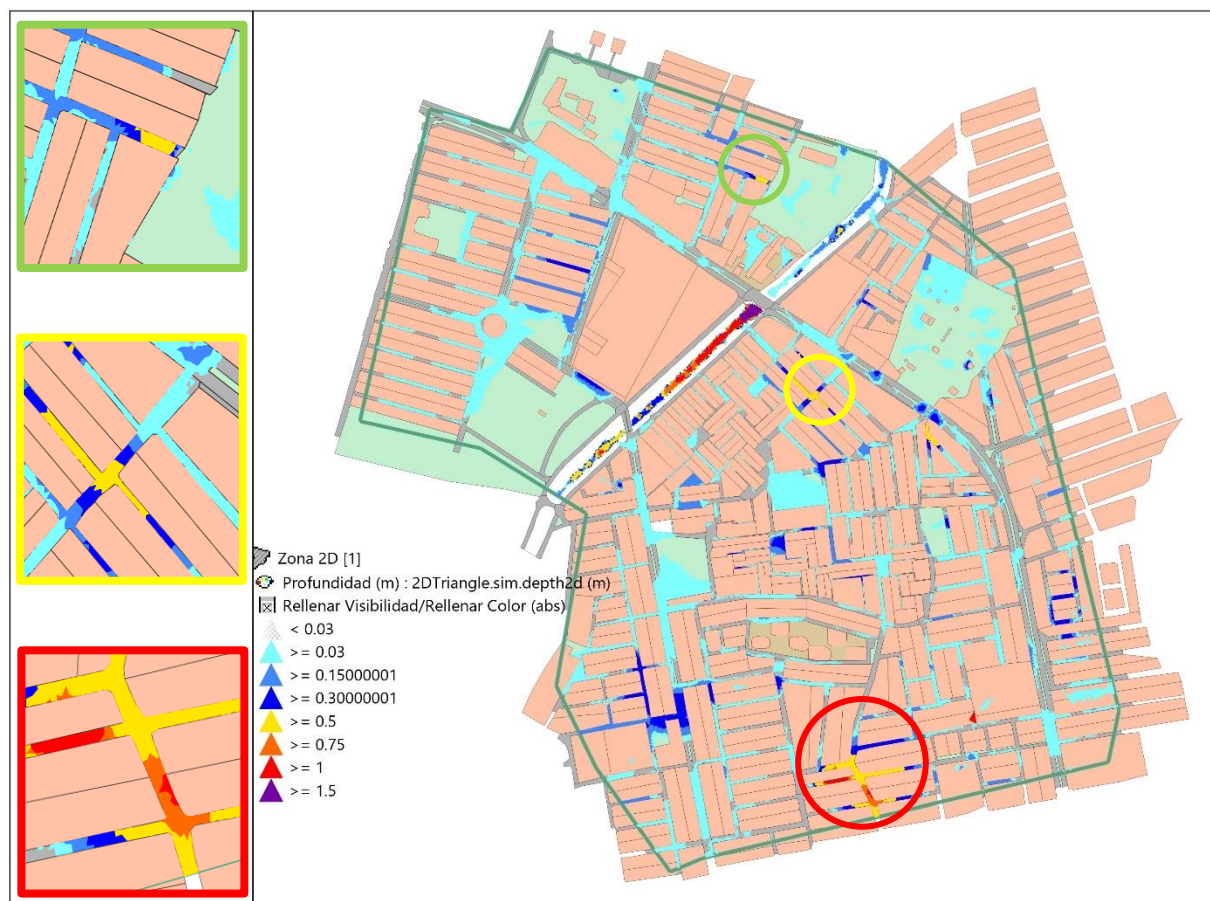
### *Profundidad Promedio y Máxima por Tiempo de Retorno*

El análisis hidrodinámico mostró variaciones significativas en las profundidades promedio y máximas en función de los tiempos de retorno evaluados (10, 25, 50 y 100 años). Para un TR de

10 años (**Figura 22**), las profundidades promedio oscilaron entre 8 y 10 cm, destacándose zonas críticas como el Barrio Tasajero, donde se alcanzaron máximos de hasta 66 cm, y el Barrio Ciudad Jardín, con profundidades de hasta 100 cm en puntos específicos. A medida que se incrementó el tiempo de retorno, las profundidades promedio y máximos aumentaron. Para el TR de 25 años (**Figura 23**), los promedios alcanzaron los 10 cm, y las mismas zonas críticas mostraron incrementos, con profundidades máximos de 70 cm en el Barrio Tasajero y 105 cm en Ciudad Jardín.

**Figura 22**

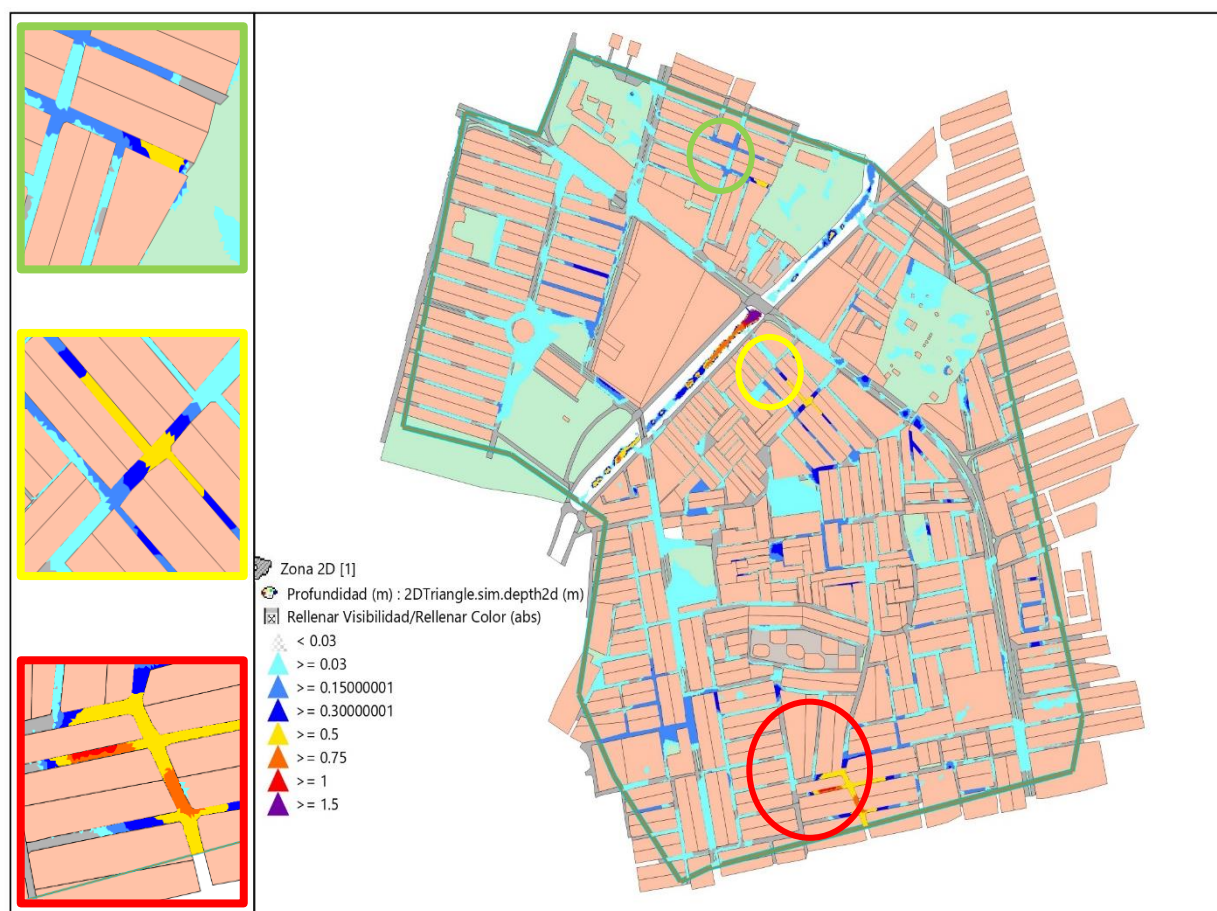
*Mapa de inundación para un tiempo de retorno de 10 años.*



*Nota:* Profundidades máximas alcanzadas en la zona de estudio durante un evento de TR 10 años.

**Figura 23.**

*Mapa de inundación para un tiempo de retorno de 25 años.*



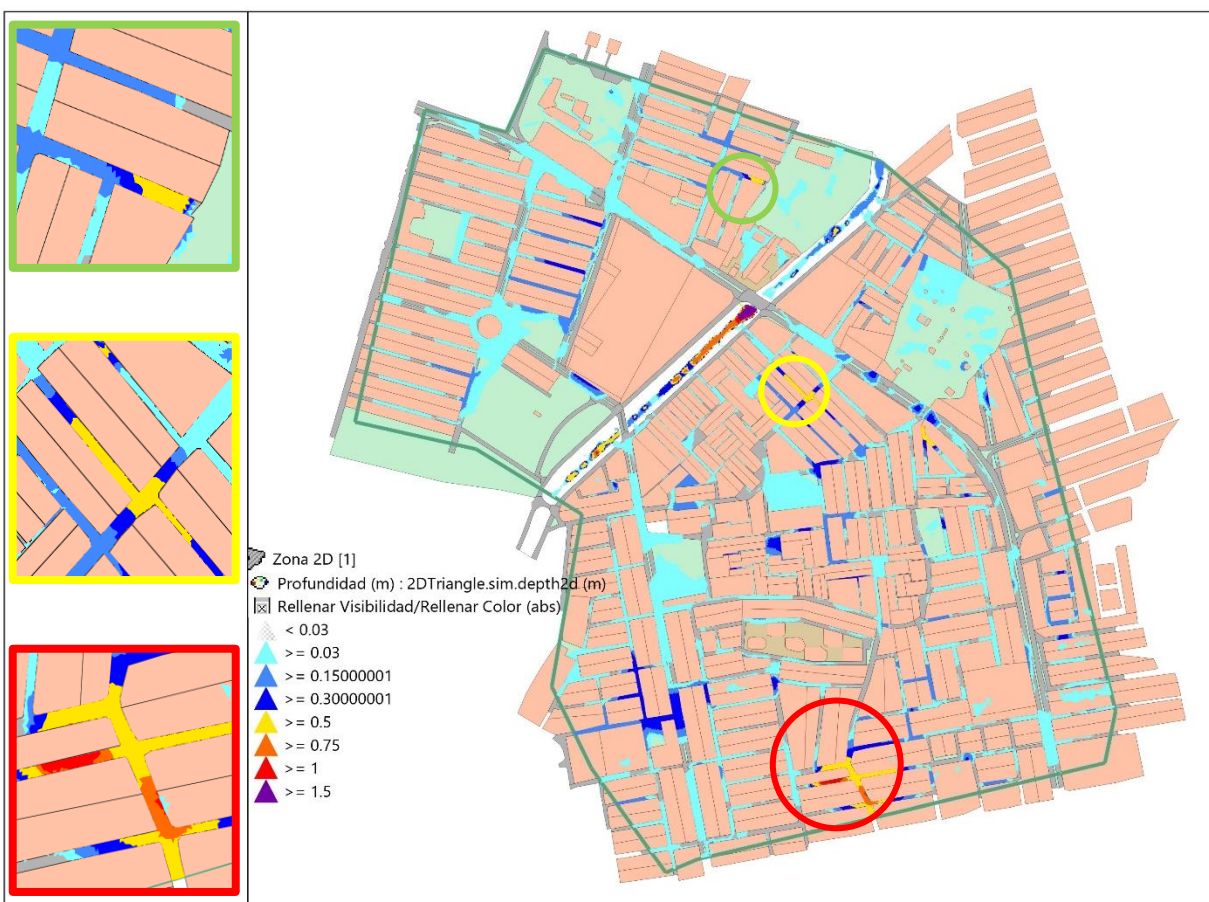
*Nota:* Profundidades máximas alcanzadas en la zona de estudio durante un evento de TR 25 años.

En eventos más extremos, como los de TR de 50 y 100 años, las profundidades promedio se incrementaron a 11 cm y 13 cm respectivamente, con máximos que superaron los 78 cm en el Barrio Tasajero y los 120 cm en Ciudad Jardín. Estas diferencias reflejan cómo las zonas críticas

se vuelven más vulnerables con el aumento de la intensidad y duración de las lluvias, destacando la necesidad de priorizar intervenciones en estas áreas.

**Figura 24**

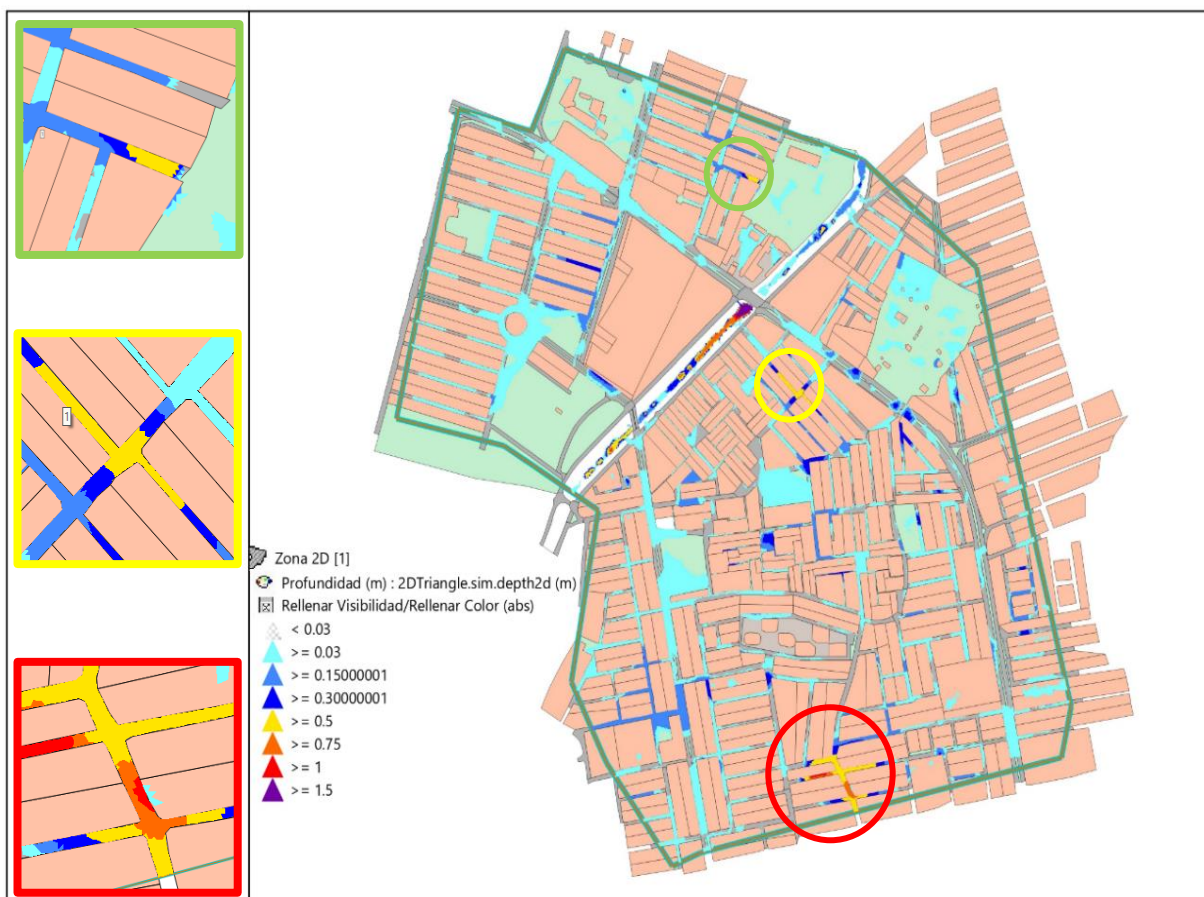
*Mapa de inundación para un tiempo de retorno de 50 años.*



*Nota:* Profundidades máximas alcanzadas en la zona de estudio durante un evento de TR 50 años.

**Figura 25.**

*Mapa de inundación para un tiempo de retorno de 100 años.*



*Nota:* Representación de las zonas más afectadas por acumulaciones de agua extrema bajo un evento de TR 100 años.

### ***Velocidades del Flujo para Tiempos de Retorno de 10 y 25 Años***

En los escenarios correspondientes a tiempos de retorno de 10 y 25 años, las velocidades promedio muestran un aumento progresivo, siendo de 0.45 m/s para el TR de 10 años y de 0.55 m/s para el TR de 25 años. Este incremento refleja la mayor intensidad y duración de los eventos

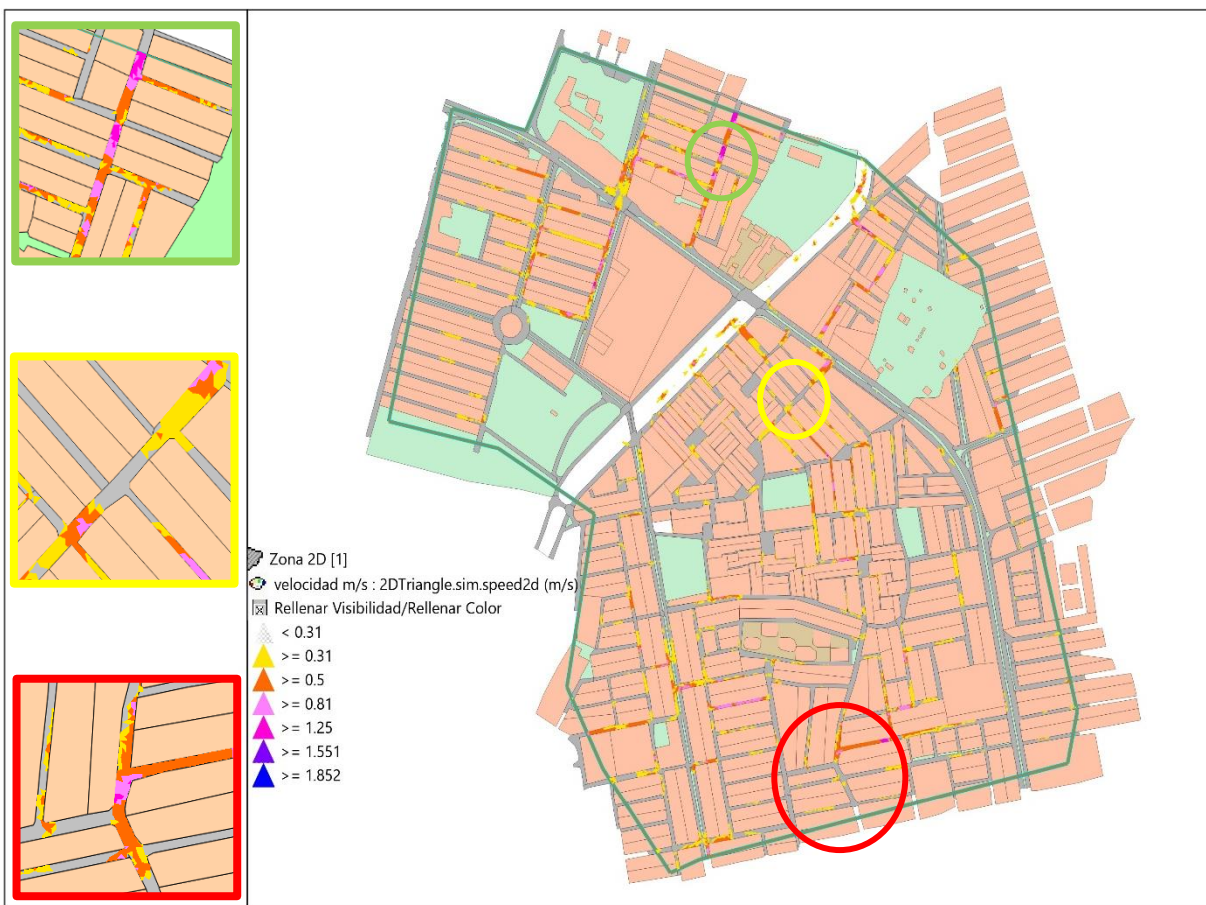
de precipitación en estos escenarios, lo que genera un flujo superficial más rápido, especialmente en zonas críticas. Dicho aumento se vincula con la limitada capacidad de infiltración del terreno en áreas urbanizadas y con la influencia de las características topográficas.

En el caso del TR de 10 años, las velocidades máximas varían entre 1.1 m/s y 1.2 m/s, con los valores más elevados registrados en el barrio Tasajero, específicamente en la Calle 21 Norte, donde las velocidades alcanzan hasta 1.1 m/s. En el barrio Zulima, la Calle 18 Norte presenta velocidades máximas de 0.9 m/s, mientras que en el barrio Ciudad Jardín, la Calle 8C Norte y la Avenida 13 Este registran valores de hasta 1.2 m/s. Estas zonas presentan alta peligrosidad debido a la predominancia de superficies impermeables, como vías pavimentadas y cubiertas, que no solo reducen la infiltración, sino que también intensifican la acumulación y aceleración del flujo.

Para el TR de 25 años, se observa un incremento tanto en las velocidades promedio como en las máximas, lo que evidencia un mayor impacto de las lluvias intensas en la dinámica del flujo. Estas velocidades elevadas generan riesgos significativos en términos de erosión, transporte de sedimentos y seguridad para peatones, especialmente en los puntos críticos identificados en los barrios mencionados.

**Figura 26.**

*Mapa de velocidades máximas para TR de 10 años.*



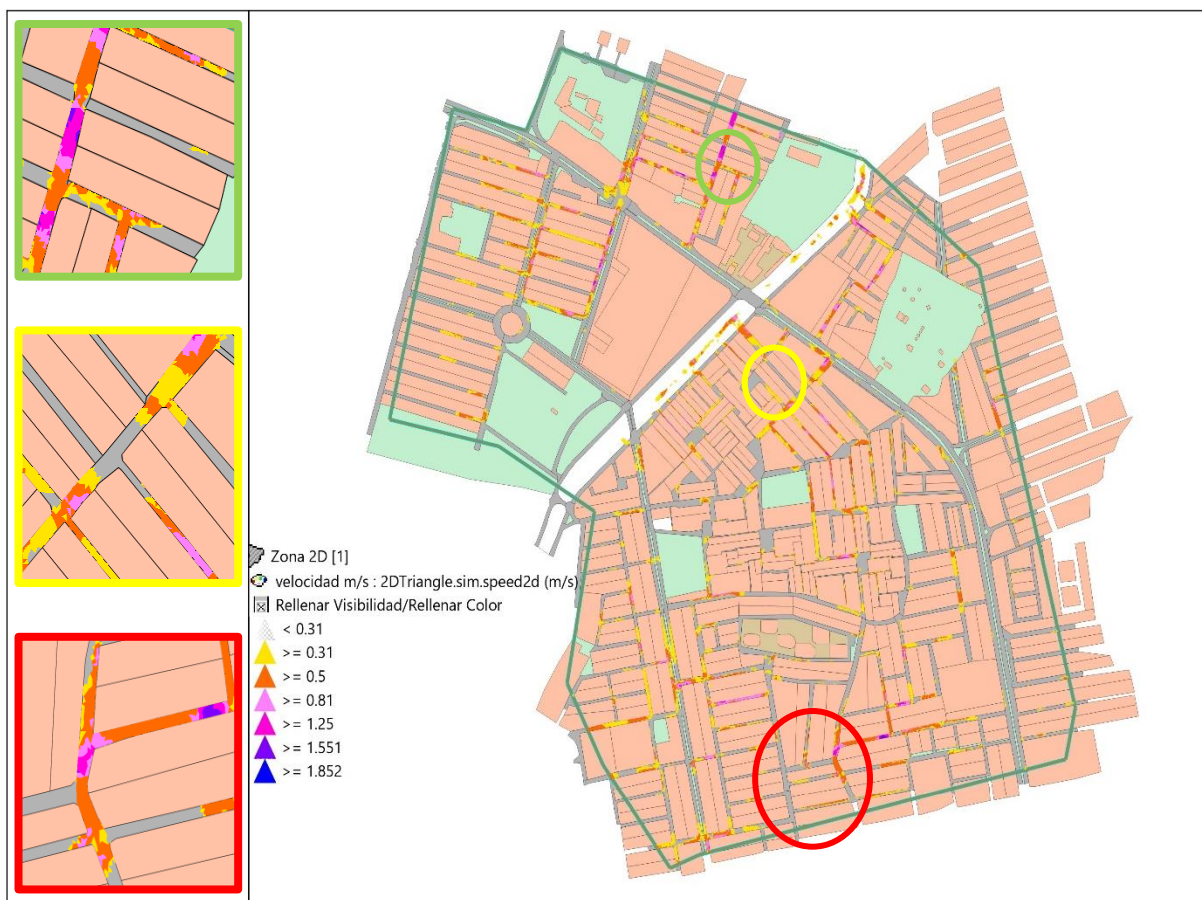
*Nota.* Velocidades máximas simuladas en el modelo hidrodinámico para un tiempo de retorno de 10 años, evidenciando los puntos con mayor impacto en los barrios Tasajero, Zulima y Ciudad Jardín.

En el caso del TR de 25 años, las velocidades máximas aumentan, variando entre 1.45 m/s y 1.5 m/s. En el barrio Tasajero, las velocidades máximas alcanzan 1.45 m/s en la Calle 21 Norte, mientras que en el barrio Zulima, las velocidades llegan a 1.0 m/s en la Calle 18 Norte. En el barrio Ciudad Jardín, las velocidades son ligeramente más altas, alcanzando 1.5 m/s en la Calle 8C Norte

y la Avenida 13 Este. La topografía de estas zonas, caracterizada por pendientes intermedias, junto con los altos niveles de impermeabilidad, explica la aceleración del flujo en estos puntos críticos.

**Figura 27.**

*Mapa de velocidades máximas para TR de 25 años.*



*Nota:* Velocidades máximas simuladas en el modelo hidrodinámico para un tiempo de retorno de 25 años, evidenciando los puntos con mayor impacto en los barrios Tasajero, Zulima y Ciudad Jardín.

### ***Velocidades del Flujo para Tiempos de Retorno de 50 y 100 Años***

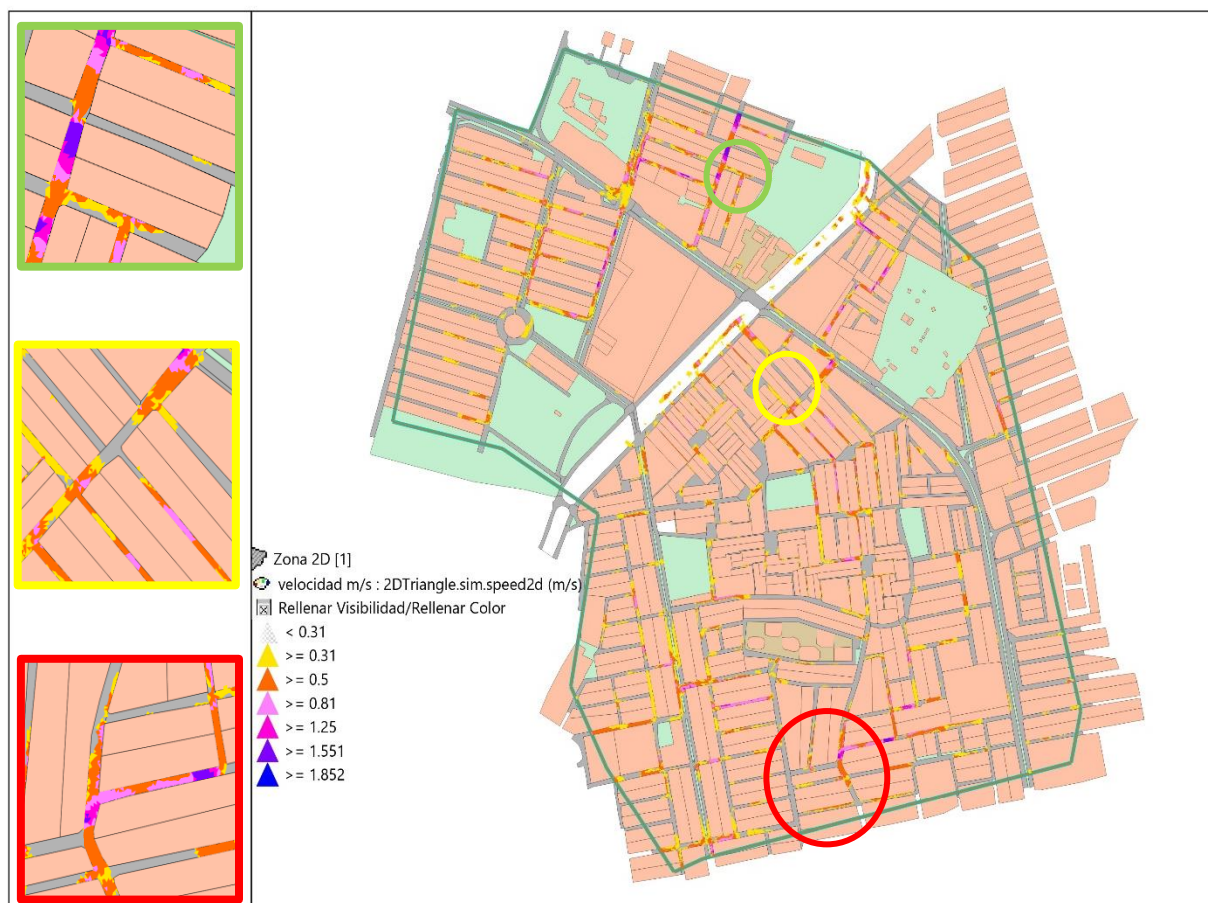
Para los tiempos de retorno de 50 y 100 años, las velocidades promedio son notablemente más altas, alcanzando 0.6 m/s para el TR de 50 años y 0.8 m/s para el TR de 100 años. Este comportamiento refleja el impacto de eventos de precipitación más extremos, caracterizados por una mayor intensidad y duración, lo que genera flujos superficiales más intensos, rápidos y peligrosos a lo largo de la zona de estudio. Estas condiciones exacerban los riesgos en áreas urbanas densamente pavimentadas, donde la escasa capacidad de infiltración intensifica el escurrimiento.

En el TR de 50 años, las velocidades máximas oscilan entre 1.6 m/s y 1.7 m/s, concentrándose principalmente en el barrio Tasajero, donde en la Calle 21 Norte se registran velocidades de hasta 1.7 m/s. Este valor indica un flujo potencialmente peligroso para la seguridad de los peatones y la estabilidad de las estructuras. En el barrio Zulima, las velocidades alcanzan un máximo de 1.25 m/s en la Calle 18 Norte, mientras que en el barrio Ciudad Jardín, en la Calle 8C Norte y la Avenida 13 Este, los valores máximos llegan a 1.6 m/s.

Para el TR de 100 años, las velocidades máximas superan los 2 m/s en algunas áreas críticas, como el barrio Tasajero, donde la Calle 21 Norte registra los valores más altos. Estas velocidades no solo superan los niveles aceptables de seguridad definidos para zonas urbanas, sino que también representan una amenaza significativa en términos de erosión, desestabilización del suelo y peligro para las personas y los vehículos. En los barrios Zulima y Ciudad Jardín, los valores permanecen por encima de los límites seguros, lo que subraya la necesidad de medidas de mitigación para reducir los impactos asociados con estos eventos extremos.

**Figura 28.**

*Mapa de velocidades máximas para TR de 50 años.*



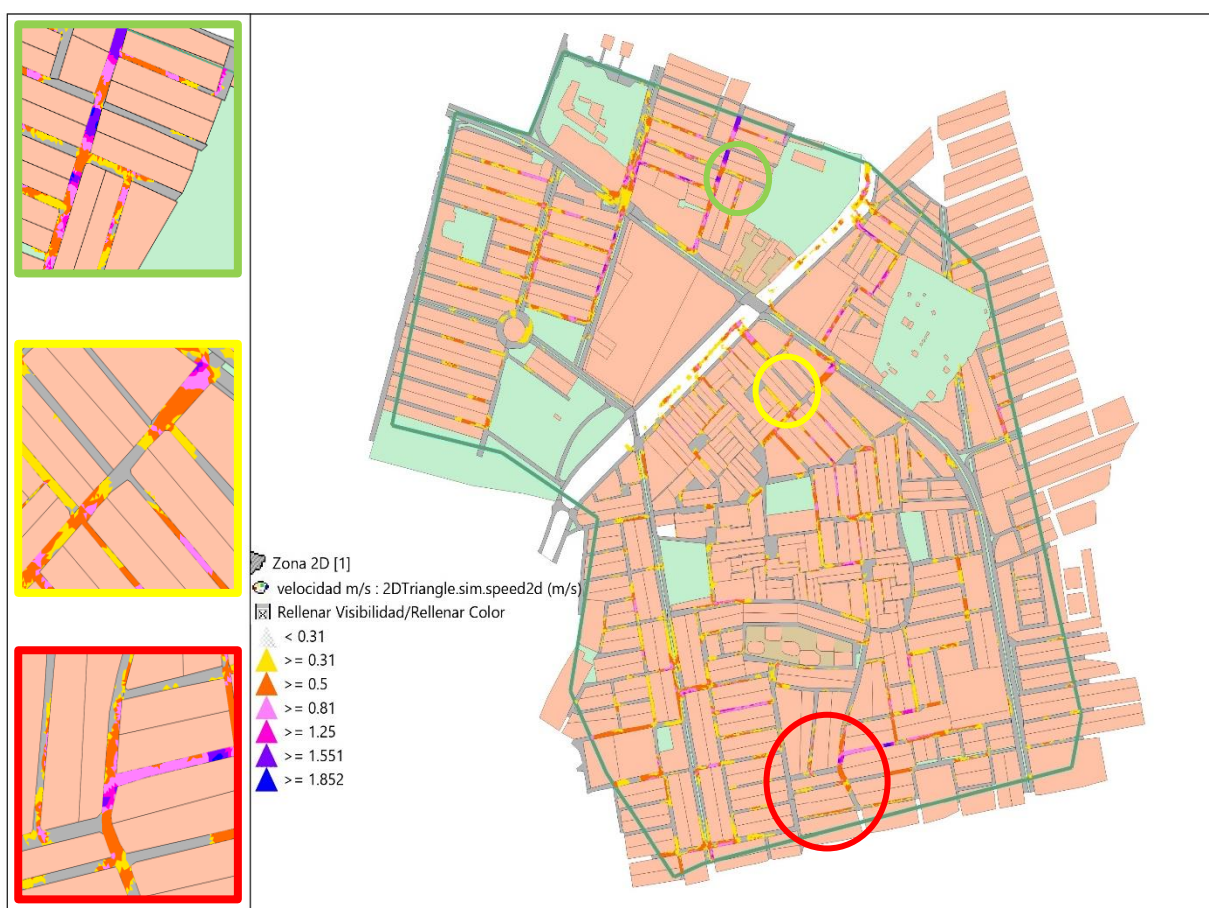
*Nota:* Velocidades máximas simuladas en el modelo hidrodinámico para un tiempo de retorno de 50 años, evidenciando los puntos con mayor impacto en los barrios Tasajero, Zulima y Ciudad Jardín.

En el TR de 100 años, las velocidades máximas alcanzan sus valores más altos, variando entre 1.9 m/s y 2.0 m/s. El barrio Tasajero presenta las velocidades más críticas, con hasta 2.0 m/s en la Calle 21 Norte. En el barrio Zulima, las velocidades llegan a 1.5 m/s en la Calle 18 Norte, mientras que en el barrio Ciudad Jardín, se registran velocidades de 1.9 m/s en la Calle 8C Norte

y la Avenida 13 Este. Este comportamiento pone de manifiesto la incapacidad de las infraestructuras actuales para manejar el flujo generado por eventos extremos, lo que resulta en riesgos significativos para la población.

**Figura 29.**

*Mapa de velocidades máximas para TR de 100 años.*



*Nota:* Representación de las velocidades máximas alcanzadas en el modelo hidrodinámico para un tiempo de retorno de 100 años, destacando las zonas críticas en los barrios Tasajero, Zulima y Ciudad Jardín.

La topografía desempeña un papel determinante en estos escenarios, con las pendientes más pronunciadas acelerando el flujo en las áreas mencionadas, mientras que las zonas más planas permiten la acumulación de agua. Este análisis resalta la importancia de un enfoque integrado para el diseño y la gestión del sistema de drenaje, teniendo en cuenta tanto las características físicas del terreno como las condiciones extremas de precipitación.

### ***Capacidad Hidráulica de la Red***

El análisis de la red subterránea (1D) mostró la capacidad de los conductos y nodos para manejar los caudales generados durante los eventos de lluvia simulados con tiempos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. Se evaluaron los 40 pozos (manholes) y los 4 outfalls (salidas), considerando sus cotas y profundidades. Además, se analizaron los 39 tramos de conductos configurados con materiales como concreto y PVC, y se verificaron los puntos de conexión entre los componentes.

En los escenarios con tiempos de retorno más altos (50 y 100 años), se evidenció una insuficiencia hidráulica en ciertos tramos de los conductos, lo que resultó en desbordamientos hacia la superficie.

### **Identificación y Caracterización de Tramos Críticos**

Durante las simulaciones realizadas en el modelo hidrodinámico, se identificaron dos tramos principales que presentaron problemas significativos relacionados con la sobrecarga hidráulica y el comportamiento de flujos bidireccionales. Estas zonas críticas destacan como puntos donde el sistema de drenaje subterráneo alcanzó o superó su capacidad de diseño, resultando en desbordamientos hacia la superficie y alteraciones en la dinámica de flujo habitual.

La caracterización de estos tramos es esencial para comprender las limitaciones estructurales y operativas del sistema de drenaje, permitiendo priorizar intervenciones que optimicen su funcionalidad y reduzcan los riesgos asociados.

### Tramo N-1 a N-3:

- **Características:** Compuesto por conductos de sección circular (350 mm) y rectangular (1850 mm) con longitudes de 43.1 m y 21.5 m respectivamente.
- **Condiciones observadas:** Durante los eventos de lluvia, el nivel del agua excedió las cotas de los pozos, provocando desbordamientos hacia la superficie.

**Figura 30.**

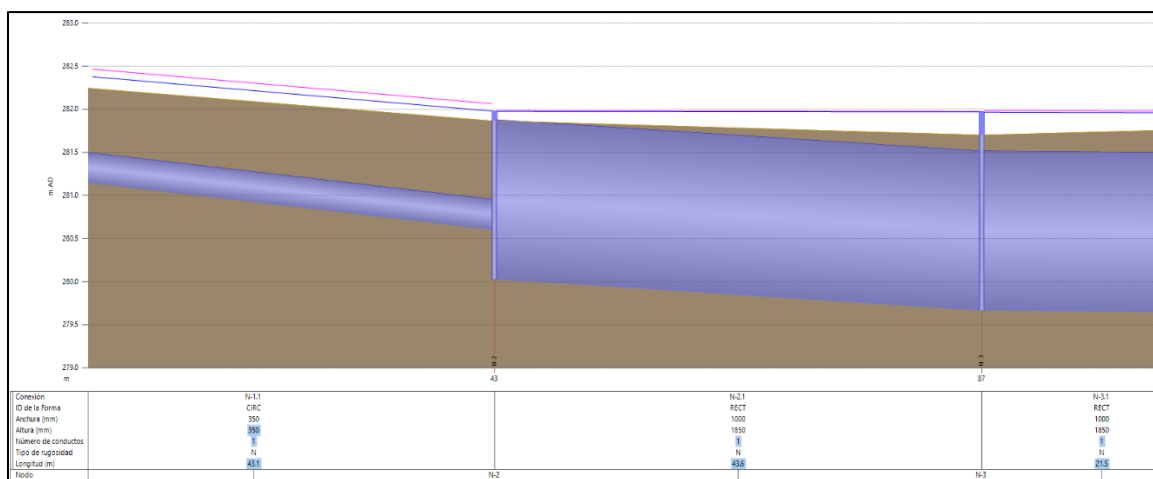
*Mapa de ubicación del tramo (N-1 a N-3) en la Avenida 2 con Calle 21A Norte*



*Nota.* La figura destaca la interacción entre el flujo subterráneo y superficial en las proximidades de la infraestructura vial.

**Figura 31**

*Perfil hidráulico del tramo N-1 a N-3.*



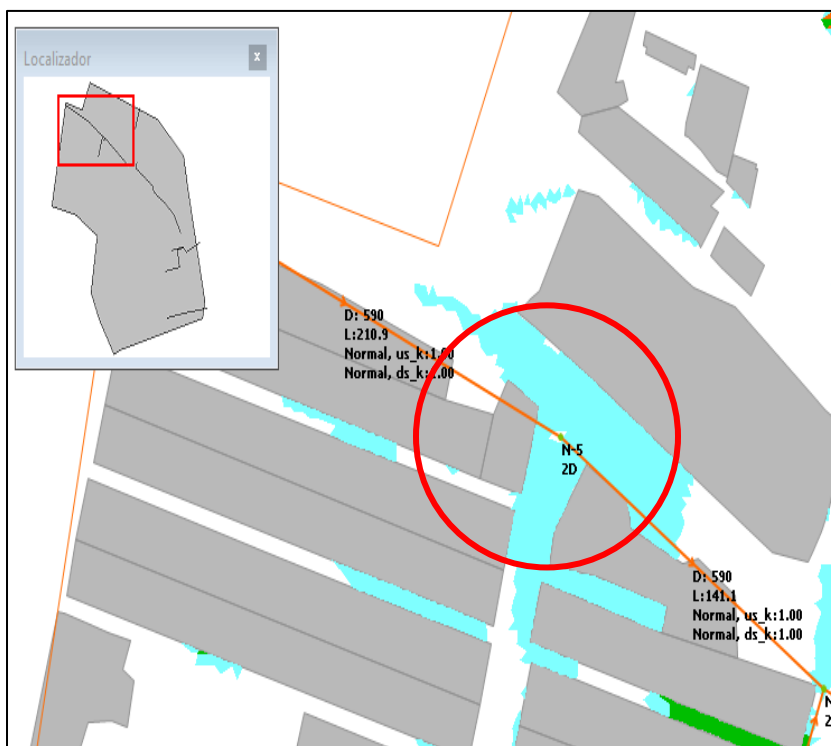
*Nota:* Representación del comportamiento bidireccional del flujo en el tramo N-1 a N-3. Se observa cómo el nivel del agua excede la cota de los pozos, generando desbordamientos significativos hacia la superficie.

#### **Tramo N-4 a N-6:**

- **Características:** Conducto de sección circular con un diámetro de 590 mm y una longitud de 210.9 m
- **Condiciones observadas:** Durante los eventos de lluvia, el nivel del agua excedió las cotas de los pozos, provocando desbordamientos hacia la superficie.

**Figura 32**

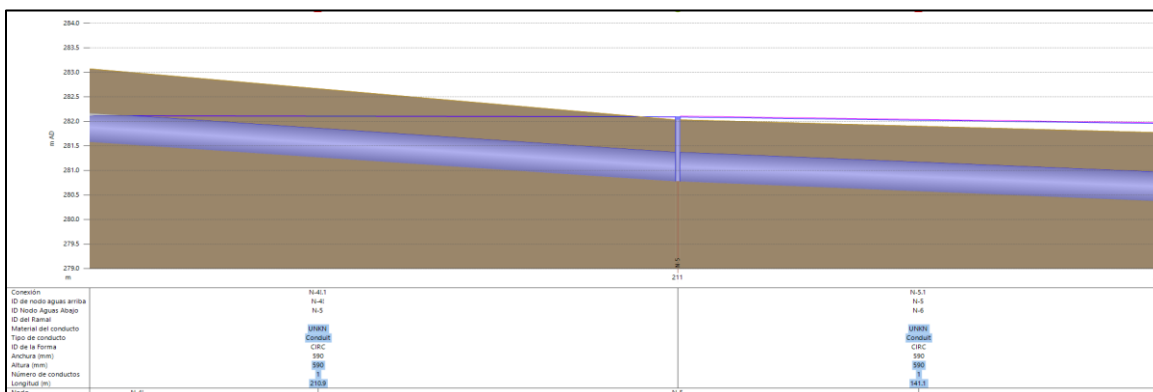
*Mapa de ubicación del tramo (N-4 a N-6) en la Avenida Libertadores con Calle 22ª Norte*



*Nota.* La figura destaca la interacción entre el flujo subterráneo y superficial.

**Figura 33.**

*Perfil hidráulico del tramo N-4 a N-6*



*Nota:* Perfil del flujo en el tramo N-4 a N-6, destacando la sobrecarga hidráulica y el retroceso del flujo. Este comportamiento afecta la continuidad del sistema y contribuye a las inundaciones en la zona 2D adyacente.

Los resultados obtenidos para los tramos N-1 a N-3 (Avenida 2 con Calle 21A Norte) y N-4 a N-6 (Avenida Libertadores con Calle 22A Norte) durante los eventos de lluvia correspondientes a tiempos de retorno de 50 y 100 años, muestran un comportamiento hidrodinámico crítico debido a la insuficiencia hidráulica de la red subterránea para manejar los volúmenes de agua generados.

### ***Evaluación del Peligro de Inundaciones Urbanas***

El análisis de la peligrosidad para los peatones en la zona de estudio se evaluó mediante las variables hidráulicas derivadas del modelo hidrodinámico 1D/2D para tiempos de retorno (TR) de 10, 25, 50 y 100 años. Se consideraron la velocidad promedio, la velocidad máxima del flujo, la profundidad máxima del agua y el producto de ambas ( $v \cdot y$ ), comparando estos valores con los criterios establecidos por Martínez-Gomariz (2016). Según este criterio, la peligrosidad se clasifica como alta cuando la profundidad del agua ( $y$ ) supera los 0.5 m, el producto  $v \cdot y$  excede  $0.22 \text{ m}^2/\text{s}$ , o la velocidad del flujo alcanza valores superiores a  $1.88 \text{ m/s}$ .

Para los tiempos de retorno 10 y 25 años, se observaron velocidades promedio de  $0.45 \text{ m/s}$  y  $0.55 \text{ m/s}$ , respectivamente. Las velocidades máximas alcanzaron  $1.2 \text{ m/s}$  en el TR de 10 años y  $1.5 \text{ m/s}$  en el TR de 25 años. Las profundidades máximas registradas fueron  $0.48 \text{ m}$  y  $0.55 \text{ m}$ , con valores de  $v \cdot y$  de  $0.58 \text{ m}^2/\text{s}$  y  $0.83 \text{ m}^2/\text{s}$ . Estos resultados indican una peligrosidad alta, especialmente en los barrios Tasajero (Calle 21 N), Zulima (Calle 18 N) y Ciudad Jardín (Av. 13

Este). Aunque en el TR de 10 años las profundidades apenas rozan el límite seguro, el producto  $v \cdot y$  supera con claridad los valores de estabilidad, generando riesgos moderados a elevados.

En los tiempos de retorno más extremos, 50 y 100 años, las condiciones hidráulicas se intensifican considerablemente. La velocidad promedio aumentó a 0.6 m/s para el TR de 50 años y 0.8 m/s para el TR de 100 años, con velocidades máximas de 1.7 m/s y 2.0 m/s, respectivamente. Las profundidades máximas del agua también incrementaron, alcanzando 0.6 m en el TR de 50 años y 0.65 m en el TR de 100 años. El producto  $v \cdot y$  superó los umbrales seguros, con valores de 1.02 m<sup>2</sup>/s y 1.3 m<sup>2</sup>/s. Estos resultados reafirman la clasificación de peligrosidad alta en las mismas zonas críticas (Tasajero, Zulima y Ciudad Jardín), donde la combinación de velocidades elevadas y profundidades considerables pone en riesgo la estabilidad de los peatones y la seguridad en las vías.

La topografía del área de estudio, caracterizada por pendientes moderadas y áreas de acumulación de flujo, amplifica la peligrosidad en estas zonas urbanas. La inclinación del terreno favorece el aumento de las velocidades del flujo, mientras que la insuficiencia de la infraestructura de drenaje contribuye a la acumulación de agua en puntos críticos. Esta interacción entre las características hidráulicas y topográficas genera un escenario de riesgo significativo, especialmente en eventos de alta magnitud como los de 50 y 100 años.

**Tabla 7.***Clasificación de la Peligrosidad*

| <b>R (años)</b> | <b>Vel.<br/>Promedio<br/>(m/s)</b> | <b>Vel.<br/>Máxima<br/>(m/s)</b> | <b>Profundidad<br/>Máxima (m)</b> | <b>v·y<br/>(m<sup>2</sup>/s)</b> | <b>Zonas Críticas</b>                                                               | <b>Peligrosidad</b> |
|-----------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 10              | 0.45                               | 1.2                              | 0.48                              | 0.58                             | Tasajero<br>(Calle 21 N),<br>Zulima (Calle<br>18 N), Ciudad<br>Jardín (Av. 13<br>E) | Alta                |
| 25              | 0.55                               | 1.5                              | 0.55                              | 0.83                             | Tasajero<br>(Calle 21 N),<br>Zulima (Calle<br>18 N), Ciudad<br>Jardín (Av. 13<br>E) | Alta                |
| 50              | 0.6                                | 1.7                              | 0.6                               | 1.02                             | Tasajero<br>(Calle 21 N),<br>Zulima (Calle<br>18 N), Ciudad<br>Jardín (Av. 13<br>E) | Alta                |
| 100             | 0.8                                | 2                                | 0.65                              | 1.3                              | Tasajero<br>(Calle 21 N),<br>Zulima (Calle<br>18 N), Ciudad<br>Jardín (Av. 13<br>E) | Alta                |

*Nota.* La tabla muestra el nivel de peligrosidad del modelo en diferentes zonas de la cuenca según los Criterios.

## Conclusiones

El análisis hidrodinámico desarrollado en InfoWorks ICM permitió evaluar de manera integral las dinámicas de inundación en la subcuenca nororiental de Cúcuta, considerando las interacciones entre los sistemas de drenaje superficial y subterráneo. Las simulaciones realizadas bajo diferentes tiempos de retorno (10, 25, 50 y 100 años) permitieron identificar patrones críticos de inundación y velocidad, destacando los puntos de mayor vulnerabilidad en la zona de estudio.

La recopilación y procesamiento de datos topográficos, hidrológicos y urbanos de alta calidad fue fundamental para garantizar la precisión del modelo. La integración de capas como el Modelo Digital de Elevación (DEM), el uso de suelo y la red de alcantarillado permitió representar con fidelidad las características geomorfológicas e hidráulicas del área. Este enfoque resaltó la importancia de contar con información detallada para modelar sistemas complejos.

La generación de hietogramas para tiempos de retorno específicos, basados en curvas IDF, permitió simular eventos de lluvia con características ajustadas a la región. Esto resultó en una representación realista de las condiciones climáticas y sus impactos en la dinámica del flujo. Los hietogramas fueron esenciales para estimar las cargas hidráulicas a las que se enfrenta el sistema de drenaje.

El modelo hidrodinámico 1D/2D construido en InfoWorks ICM integró los flujos superficiales y subterráneos de manera efectiva, reflejando la complejidad de las dinámicas hidráulicas urbanas. La calibración del modelo, con un NSE de 0.849, validó su capacidad para replicar las condiciones observadas. Este proceso permitió identificar la interacción entre la red

subterránea y la acumulación de agua en superficie, destacando la relevancia de las conexiones entre ambos sistemas.

Los mapas de inundación y velocidad generados para los diferentes escenarios de tiempo de retorno identificaron áreas críticas, como los barrios Ciudad Jardín, Zulima y Tasajero, donde las profundidades superan los límites de seguridad. Además, se observó que los desbordamientos en la red subterránea contribuyen significativamente a las acumulaciones de agua en la superficie, intensificando los riesgos en vías principales.

Finalmente, se resalta que las dinámicas de inundación urbanas no solo afectan infraestructuras, sino que también impactan directamente la seguridad y calidad de vida de los habitantes. Por ello, el modelo desarrollado y sus resultados sirven como base para futuras investigaciones y proyectos que busquen optimizar el sistema de drenaje de Cúcuta y adaptar la ciudad a los desafíos asociados al cambio climático.

## **Recomendaciones**

### **Mejoras en la red de drenaje subterránea**

Priorizar la ampliación de conductos y la implementación de nuevas salidas en las zonas críticas identificadas para reducir los desbordamientos hacia la superficie.

### **Soluciones basadas en la naturaleza**

Promover la implementación de pavimentos permeables y áreas verdes para mejorar la infiltración y disminuir la escorrentía en zonas urbanas.

### **Actualización del modelo**

Mantener actualizados los datos de uso del suelo y precipitaciones para garantizar que el modelo refleje las condiciones actuales de la subcuenca.

### **Planes de emergencia y mitigación**

Diseñar mapas de riesgo e implementar protocolos de evacuación para zonas vulnerables, especialmente en las vías principales afectadas por las inundaciones.

## Referencias

- Acosta-Coll, M., Ballester-Merelo, F., & Martínez-Peiró, M. (2018). Early warning system for detection of urban pluvial flooding hazard levels in an ungauged basin. *Natural Hazards*, 92(2), 1237-1265. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3249-4>
- Aranda, J. Á., Beneyto, C., Sánchez-Juny, M., & Bladé, E. (2021). Efficient Design of Road Drainage Systems. *Water*, 13(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/w13121661>
- Andimuthu, R., Kandasamy, P., Mudgal, B. V., Jeganathan, A., Balu, A., & Sankar, G. (2019). Performance of urban storm drainage network under changing climate scenarios: Flood mitigation in Indian coastal city. *Scientific Reports*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43859-3>
- Aragón-Durand, F. (2014). Inundaciones en zonas urbanas de cuencas en América Latina por Dr.Fernando Aragón-Durand.
- Autodesk. (2024a). 1D simulation of pipe networks in InfoWorks ICM. Autodesk. Recuperado de <https://help.autodesk.com/view/IWICMS/2024/ENU/?guid=GUID-3AF862EF-FC9D-4632-BACD-06CC4BC0431C>
- Autodesk. (2024b). 2D simulation of overland flow in InfoWorks ICM. Autodesk. Recuperado de <https://help.autodesk.com/view/IWICMS/2024/ENU/?guid=GUID-2869BC5A-BE5B-4ED8-9460-37436F36F65F>
- Bermúdez, M., Ntegeka, V., Wolfs, V., & Willems, P. (2018). Development and Comparison of Two Fast Surrogate Models for Urban Pluvial Flood Simulations. *Water Resources Management*, 32(8), 2801-2815. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1959-8>

- Bermúdez, M., Neal, J., Bates, P., Coxon, G., & Freer, J. (2018). Quantifying uncertainty in high-resolution urban flood modelling. *Water Resources Research*, 54(2), 796-821.  
<https://doi.org/10.1029/2017WR021139>
- Bonilla, C., Ramón Valencia, J., & Ramón Valencia, J. (2022). SISTEMAS DE DRENAJE URBANO - SUMIDEROS DE CAPTACIÓN DE AGUAS LLUVIAS.
- Bulti, D. T., & Abebe, B. G. (2020). A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(3), 1293-1302.  
<https://doi.org/10.1007/s40808-020-00803-z>
- Cea, L., & Bladé, E. (2015). A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research*, 51(7), 5464-5486. <https://doi.org/10.1002/2014WR016547>
- Constitución Política de Colombia [Const]. Art 79 de julio de 1991 (Colombia).
- Concha Jopia, R., & Valentin, M. (2011). Una aproximación a la modelización del drenaje dual urbano mediante EPA SWMM 5.0
- Cortés-Zambrano, M., Amaya-Tequia, W. E., Gamba-Fernández, D. S., Cortés-Zambrano, M., Amaya-Tequia, W. E., & Gamba-Fernández, D. S. (2021). Implementation of the hydraulic modelling of urban drainage in the northeast sector, Tunja, Boyacá. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 101, 74-83.  
<https://doi.org/10.17533/udea.redin.20200798>
- Dong, B., Xia, J., Zhou, M., Li, Q., Ahmadian, R., & Falconer, R. A. (2022). Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles. *Science of The Total Environment*, 827, 154098.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154098>

Fan, Y., Ao, T., Yu, H., Huang, G., & Li, X. (2017). A Coupled 1D-2D Hydrodynamic Model for Urban Flood Inundation. *Advances in Meteorology*, 2017, e2819308. <https://doi.org/10.1155/2017/2819308>

Fraga Cadórniga, I. (2015). Desarrollo de un modelo dual 1D/2D para el cálculo del drenaje urbano: Modelo numérico y validación experimental [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidade da Coruña]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=45422>

González-Velandia, J. C. (2014). La gestión del riesgo de desastres en las inundaciones de Colombia: Una mirada crítica. <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/1c455b0e-a016-4c36-bebe-a08b16759e29>

Guo, K., Guan, M., & Yu, D. (2021). Urban surface water flood modelling – a comprehensive review of current models and future challenges. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(5), 2843-2860. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2843-2021>

HidraSoftware. (2021). Diseño de Sistemas de Drenaje Urbano con DREN-URBA | HidraSoftware. <https://www.hidrasoftware.com/disenio-de-sistemas-de-drenaje-urbano-con-dren-urba/>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Innovyze. (2021). InfoWorks ICM: Integrated Catchment Modeling Software. Autodesk.

Recuperado de <https://www.autodesk.com/products/infoworks-icm>

Ley 99 de 1993 Gestor Normativo. (n.d.). Función Pública.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>

Luo, P., Luo, M., Li, F., Qi, X., Huo, A., Wang, Z., He, B., Takara, K., Nover, D., & Wang, Y.

(2022). Urban flood numerical simulation: Research, methods and future perspectives  
Environmental Modelling & Software, 156, 105478.

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105478>

Martínez-Gomari, J. (2016). *Inundaciones urbanas: criterios de peligrosidad y evaluación del riesgo para peatones y vehículos*. Tesis doctoral, UPC, Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, 2016. DOI 10.5821/dissertation-2117-106280 . Disponible en: <<http://hdl.handle.net/2117/106280>>

Montalvo, C., Reyes-Silva, J. D., Sañudo, E., Cea, L., & Puertas, J. (2024). Urban pluvial flood modelling in the absence of sewer drainage network data: A physics-based approach. *Journal of Hydrology*, 634, 131043. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131043>

Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS | Minvivienda. (n.d.).<https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/reglamento-tecnico-sector/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras>

Rincón Ortiz, J., & Muñoz, M. (2013). Diseño hidráulico de sistemas de drenaje dual a través del modelo SWMM. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34, 103-117.

- Sánchez Tapiero, D. I. (2023). Cuantificación de la Peligrosidad en Peatones por Inundaciones de Origen Pluvial en Cuencas Urbanas Usando Lenguaje de Programación Python y el Modelo Avanzado de Gestión de Aguas Pluviales (PCSWMM). Universidad de Pamplona.
- Sanz-Ramos, M., Cea, L., Bladé, E., López-Gómez, D., Sañudo, E., Corestein, G., García-Alén, G., & Aragón-Hernández, J. L. (2022). Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones. <https://doi.org/10.23967/iber.2022.01>
- Semana. (2022, septiembre 6). Cúcuta cuenta con un modelo de transformación y renovación urbana. Semana.com Últimas Noticias de Colombia y el Mundo. <https://www.semana.com/nacion/cucuta/articulo/cucuta-cuenta-con-un-modelo-de-transformacion-y-renovacion-urbana/202212/>
- Van Assel, J., Kroll, S., & Delgado, R. (2023). Calculation of Dry Weather Flows in Pumping Stations to Identify Inflow and Infiltration in Urban Drainage Systems. *Water*, 15(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/w15050864>
- vacations Group. (2024). Cultura y tradiciones de Cúcuta, Norte de Santander – Colombia – Colombia. <https://elturismoencolombia.com/a-donde-ir/cucuta-travel/cultura-y-tradiciones-cucuta-colombia/>
- Zhou, Q., Luo, J., Su, J., & Ren, Y. (2021). Impacts of changing drainage indicators on urban flood volumes in historical urbanization in the case of Northern China. *Urban Water Journal*, 18(7), 487-498. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1893366>
- Zhou, Q. (2014). A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. *Water*, 6(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/w6040976>