

Modelo Hidrológico e Hidráulico (1D) para evaluar el sistema de drenaje urbano en la
avenida Guaimaral entre calle 9 Norte y 20 Norte de la ciudad de San José de Cúcuta, Norte de
Santander

Laura Marin Tamayo

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 Hidrológico e Hidráulico (1D) para evaluar el sistema de drenaje urbano en la
avenida Guaimaral entre calle 9 Norte y 20 Norte de la ciudad de San José de Cúcuta, Norte de
Santander

Laura Marin Tamayo

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

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, quienes han sido mi mayor fuente de apoyo y motivación, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi capacidad. Es por ello que soy lo que soy ahora. Los amo con mi vida.

A mi hermana, por su ánimo y por creer en mí en todo momento. Su apoyo ha sido fundamental durante este viaje.

A mi tutor de tesis, Ing. Diego Sánchez, por su invaluable guía, paciencia y conocimientos compartidos. Su dedicación y orientación han sido cruciales para la realización de este trabajo.

A mis profesores y mentores, quienes me han brindado su sabiduría y experiencia a lo largo de mi formación académica. Sus enseñanzas han dejado una huella imborrable en mi desarrollo profesional y personal.

A mis amigos, por su compañía y apoyo incondicional. Gracias por estar siempre ahí, brindándome palabras de aliento y compartiendo momentos inolvidables.

A mis compañeros de estudio, por los esfuerzos compartidos y el espíritu de colaboración. Juntos hemos superado desafíos y celebrado logros que nunca olvidaré.

A todos aquellos que de alguna manera contribuyeron a este proyecto, ya sea con su tiempo, conocimientos o apoyo moral, les estoy profundamente agradecida.

Finalmente, agradezco a Dios por darme la fuerza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para completar esta etapa de mi vida.

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	17
Objetivo General	17
Objetivos Específicos.....	17
MARCO REFERENCIAL	18
MARCO DE ANTECEDENTES O ESTADO DEL ARTE.....	18
MARCO TEÓRICO.....	20
Drenaje urbano	21
EPA SWMM	22
Modelación hidráulica.....	23
Procesos hidrológicos.....	23
Modelo de Nash-Sutcliffe	24
MARCO LEGAL	25
MARCO CONTEXTUAL	26
METODOLOGÍA	29
RESULTADOS.....	35
CONCLUSIONES	58
RECOMENDACIONES.....	60
REFERENCIAS.....	62

APÉNDICES.....	67
----------------	----

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe</i>	25
Tabla 2 <i>Descripción de normas.</i>	25
Tabla 3 <i>Valores de coeficientes a, b, c, d para el cálculo de las curvas IDF para Colombia</i>	31
Tabla 4 <i>Selección de región</i>	36
Tabla 5 <i>Valores del coeficiente n de Manning para flujo en canales abiertos</i>	47
Tabla 6 <i>Definiciones de tipo de suelo</i>	48
Tabla 7 <i>Numero de curva para escorrentía (CN) según el SCS</i>	48
Tabla 8 <i>Calculo del coeficiente Nash y Sutcliffe para verificación del modelo realizado.</i>	52
Tabla 9 <i>Tiempo transcurrido y su respectiva profundidad en el pozo 16 para datos reales Vs datos simulados</i>	53

Lista de figuras

Figura 1 Representación de logotipo de herramienta computacional SWMM.....	22
Figura 2 Mapa de ubicación	28
Figura 3 Regiones en Colombia para definición de parámetros <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i> y <i>d</i>	31
Figura 4 Fases de metodología	34
Figura 5 Datos pluviométricos de la estación Aeropuerto Camilo Daza	35
Figura 6 Datos pluviométricos de la estación Tasajero	36
Figura 7 Curvas IDF	37
Figura 8 Cálculos TR3	38
Figura 9 Hietograma TR3	39
Figura 10 Cálculos TR5	40
Figura 11 Hietograma TR5	40
Figura 12 Cálculos TR10	41
Figura 13 Hietograma TR10	41
Figura 14 Cálculos TR50	42
Figura 15 Hietograma TR50	42
Figura 16 Cálculos TR100	43
Figura 17 Hietograma TR100	44
Figura 18 Ubicación de pozos.....	45
Figura 19 Valores por defecto.....	46
Figura 20 Creación de TimeSeries.....	46
Figura 21 Porcentaje de error en el modelo	49
Figura 22 Simulación sin niveles de inundación.....	50

Figura 23 <i>Simulación con niveles de inundación</i>	50
Figura 24 <i>Medición de datos para calibración.....</i>	51
Figura 25 <i>Mapa de velocidad para TR3 transcurridos 30 min</i>	54
Figura 26 <i>Mapa de velocidad para TR5 y TR10 transcurridos 30 min</i>	55
Figura 27 <i>Mapa de velocidad para TR50 y TR100 transcurridos 30 min</i>	55
Figura 28 <i>Mapa de inundación para TR3 transcurridos 30 min</i>	56
Figura 29 <i>Mapa de inundación para TR5 y TR10 transcurridos 30 min</i>	57
Figura 30 <i>Mapa de inundación para TR50 y TR100 transcurridos 30 min</i>	57

Lista de Apéndices

Apéndice A: Cálculos, presentados en un archivo tipo Microsoft Excel

Apéndice B: Profundidad de nodos, presentados en un archivo tipo archivo PDF

Glosario

Colmatación: Se refiere a la acumulación y depósito de residuos sólidos en los cuerpos de agua y en sistemas de drenaje.

Densidad poblacional: Es la cantidad de personas que en promedio habitan por unidad de superficie. Usualmente esta medida se adopta en kilómetros cuadrados o en hectáreas.

Escurrentía: Proceso físico en el cual se da escurrimiento de agua lluvia por la red de drenaje, hasta alcanzar la red fluvial.

Hietograma: Representación gráfica en la que se plasma la variación o intensidad de precipitación con respecto al tiempo.

Percolación: Proceso natural por el cual el agua se infiltra a través de las diferentes capas del suelo, desde la superficie hasta las capas más profundas.

Pluviómetro: Instrumento comúnmente utilizado para medir la cantidad de lluvia.

Precipitación: Es la caída al suelo del agua contenida en las nubes presentes en la atmosfera.

Tiempo de concentración: Tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escurrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre.

Resumen

El presente proyecto de investigación implementó un modelo hidrológico e hidráulico unidimensional (1D) para evaluar el sistema de drenaje urbano actual de la subcuenca en estudio, delimitada por la Avenida Guaimaral entre las calles 9 Norte y 20 Norte, en la ciudad de San José de Cúcuta, Norte de Santander. Para esto, se utilizó el modelo Storm Water Management Model (SWMM) como herramienta de cálculo hidrológico e hidráulico, permitiendo procesar la información necesaria y obtener el comportamiento espacio-temporal de la escorrentía superficial.

Se recolectó información primaria y secundaria sobre la infraestructura urbana y los parámetros geomorfológicos de la subcuenca (área, perímetro, ancho y longitud principal). Además, se construyeron hietogramas de precipitación utilizando datos pluviométricos existentes provenientes de las estaciones del IDEAM, con el objetivo de obtener la lluvia de diseño para los diferentes periodos de retorno (3, 5, 10, 50 y 100 años).

El modelo resultante identificó 132 subcuencas, que incluyen áreas completamente verdes, zonas impermeabilizadas debido a las cubiertas de las viviendas, y una combinación de ambas. Se registraron 77 pozos de recolección y una descarga ubicada en el canal de Bogotá. La modelación mostró un error inferior al 1%, lo que indica una alta continuidad de flujo y escorrentía.

El sistema de drenaje fue finalmente modelado y calibrado. La modelación se llevó a cabo con la ayuda del software para estimar el comportamiento de este ante eventos de precipitación. La calibración se realizó utilizando datos observados provenientes de la tesis de investigación "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)" donde se obtuvieron mapas de velocidades y mapas de inundación para cada uno de los periodos de retorno antes mencionados.

Abstrac

The present research project implemented a one-dimensional (1D) hydrological and hydraulic model to evaluate the current urban drainage system of the sub-basin under study, delimited by Guaimaral Avenue between 9th North Street and 20th North Street, in the city of San José de Cúcuta, Norte de Santander. The Storm Water Management Model (SWMM) was used as a hydrological and hydraulic calculation tool, allowing for the processing of necessary information and obtaining the spatiotemporal behavior of surface runoff.

Primary and secondary information was collected on the urban infrastructure and geomorphological parameters of the sub-basin (area, perimeter, main width, and length). Additionally, precipitation hyetographs were constructed using existing pluviometric data from IDEAM stations to obtain the design rainfall for different return periods (3, 5, 10, 50, and 100 years).

The resulting model identified 132 sub-basins, including completely green areas, impervious zones due to residential rooftops, and a combination of both. It recorded 77 collection wells and one discharge point located in the Bogotá canal. The modeling showed an error of less than 1%, indicating high continuity of flow and runoff.

The drainage system was finally modeled and calibrated. The modeling was carried out with the help of the software to estimate its behavior during precipitation events. The calibration was performed using observed data from the research thesis "Quantification of Pedestrian Hazard due to Rainfall-Induced Flooding in Urban Basins Using Python Programming Language and the

Storm Water Management Model (SWMM)," where velocity maps and flood maps were obtained for each of the aforementioned return periods.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son uno de los riesgos naturales más comunes a nivel mundial, como lo expone el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER, 2021). Por ende, la aplicación de un modelo de simulación hidrológica confiable puede ayudar a predecir el balance hídrico después de una tormenta de lluvia (Dey et al., 2007).

En las ciudades en desarrollo, el porcentaje de impermeabilidad de una cuenca urbanizada reduce la infiltración, lo que conduce a un aumento del volumen total de escorrentía. Además, debido a que la red de drenaje es menos rugosa que el medio natural, la velocidad del agua es mayor y los tiempos de concentración son menores. Estos dos factores conllevan caudales punta mayores en los hidrogramas de los eventos de precipitación (Moreno et al., 2021).

De acuerdo con lo anterior, este factor evidencia una problemática de infraestructura, ya que muchos sectores de la ciudad no cuentan con un sistema adecuado de recolección de aguas lluvias, lo que ocasiona inundaciones, encharcamientos y desbordamientos, así como la obstrucción de alcantarillados pluviales por causa de la escorrentía. Por esta razón, el análisis para la implementación de un sistema urbano de drenaje sostenible es una alternativa viable para barrios con déficit de alcantarillado y propensos a inundaciones, así como para futuras urbanizaciones.

Esta problemática se ha convertido en un área de estudio importante para ingenieros y diseñadores enfocados en el control de escorrentía superficial mediante drenajes urbanos. Esta investigación se centra en determinar si es posible reducir o mitigar las inundaciones en la zona demarcada por la Avenida Guaimaral entre la calle 9 Norte y 20 Norte, ubicada en la ciudad de San José de

Cúcuta, Norte de Santander, a través de un modelo hidrológico e hidráulico (1D) que evalúe el sistema de drenaje urbano presente en dicha área.

La predicción correcta de las inundaciones en las cuencas urbanas es un desafío, ya que los modelos tradicionales de drenaje urbano consideran solo la red de alcantarillado, la cual es capaz de simular el sistema de drenaje correctamente hasta que no haya desbordamiento en las entradas de la red o pozos de registro. Por lo tanto, cuando ocurren estos desbordamientos debido a la capacidad insuficiente de las tuberías o canales, resulta difícil reproducir las extensiones reales utilizando estas técnicas de simulación monofásicas tradicionales. Así, la situación de inundación correcta rara vez se aborda con los modelos tradicionales disponibles (Juan M Stella et al., 2018).

Para lograr una representación más cercana a la realidad del comportamiento de una cuenca urbana durante un episodio de lluvia, es importante considerar la interacción hidráulica entre el flujo en las calles y el flujo en los colectores. Debido a la problemática actual de las inundaciones en la zona de estudio a raíz de las precipitaciones, se hace necesario implementar un modelo hidrológico e hidráulico que permita conocer el comportamiento de las inundaciones por encharcamiento generadas en el tramo establecido. Esto con el fin de evaluar el sistema de drenaje urbano delimitado, utilizando la herramienta computacional SWMM, para identificar puntos específicos de inundación o donde los niveles de agua o su velocidad puedan representar un peligro para los transeúntes.

OBJETIVOS

Objetivo General

Construir un modelo Hidrológico e Hidráulico (1D) en el software SWMM para evaluar el sistema de drenaje urbano de la avenida Guaimaral entre calle 9 Norte y 20 Norte de la ciudad de San José de Cúcuta, Norte de Santander.

Objetivos Específicos

- Revisar la información primaria y secundaria existente de la zona de estudio como análisis técnico y descriptivo con el fin de conocer el estado actual del sistema de drenaje urbano.
- Construir el modelo conceptual de la subcuenca en estudio a través del software SWMM como análisis técnico y descriptivo de la zona representando el sistema de drenaje urbano existente.
- Obtener los eventos de lluvia históricos para evaluar el sistema de drenaje existente mediante la información pluviométrica de la zona de estudio.
- Modelar computacionalmente el sistema de drenaje de la subcuenca para evaluar el comportamiento y conocer su respuesta ante eventos extremos del clima.

MARCO REFERENCIAL

Marco de antecedentes o estado del arte

Desde los años 70 se han aplicado modelos matemáticos para simular eventos de lluvia y el escurrimiento relacionado a las mismas para controlar inundaciones (Li et al., 2011); donde normalmente son eventos no deseados, los cuales se presentan por desbordamientos en los tramos bajos aledaños a las corrientes naturales donde la pendiente del cauce es pequeña y la capacidad de transporte de sedimentos es reducida. En la mayoría de los casos las inundaciones son producidas por crecientes extraordinarias que no pueden evitarse, por ello es necesario crear formas de reducir sus efectos, a partir de control de inundaciones con la implementación de obras civiles para mantener el cauce dentro del río teniendo en cuenta la ocurrencia de eventos con el concepto de periodo de retorno (DNP 2005). En cuanto a las inundaciones se encuentran entre las más comunes y destructivas amenazas naturales. Estos eventos generan pérdidas millonarias y tienen diversos efectos adversos en las comunidades que se ven afectadas. De acuerdo con la Organización para la cooperación y el desarrollo económico (OECD) se estima que llegan a ocasionar daños anuales por más de USD \$40 mil millones en el mundo (National Geographic, 2019). En Europa, las 1672 catástrofes que se han registrado en el periodo de 1970 y 2019 provocaron alrededor de 159.438 muertes y generaron daños económicos por 476.500 millones de dólares. Cada vez son más los estudios que constatan la influencia humana en las precipitaciones extremas. Con relación a ello, el Servicio Meteorológico Nacional alemán registró una precipitación equivalente a dos meses en un periodo de dos días en el mes de julio, así mismo, el Servicio Meteorológico de Henan (China), específicamente en Zhengzhou se registró un equivalente a la mitad de su precipitación anual en un periodo de seis horas (ONU 2021).

Por otra parte, en la actualidad los países en vía de desarrollo su densidad poblacional va en aumento, donde ciudades con más de un millón de habitantes no se han planificado de la manera correcta, lo que esto conduce a una difícil provisión y manejo de servicios básicos en algunas zonas (Barreto 2012); a la vez este acelerado proceso de urbanización, se presenta asimismo en América Latina y Colombia (Y Castrillón). A nivel local, por medio del Estudio Nacional del Agua (2018) el IDEAM identificó que en Colombia existen 190.935 km² de área propicia a inundaciones, es decir, un 17% del territorio nacional. Concretamente a finales del año 2010 y comienzos del 2011, Norte de Santander fue uno de los departamentos más afectados por el fenómeno de la niña, incrementando las inundaciones que provocaron alrededor de 27.506 familias con pérdidas parciales o totales, 9.041 viviendas damnificadas o destruidas, afectando en el 80% de la infraestructura vial generando un retroceso en el desarrollo general (PDGRD Norte de Santander et al.), de igual forma, la Unidad Nacional para la Gestión de Riesgos de Desastres (UNGRD) se encontró que San José de Cúcuta es el municipio de Norte de Santander con mayor cantidad de inundaciones debidas a las precipitaciones, de este modo se debe agregar que, mediante el Plan Integral De Cambio Climático se indicó que San José de Cúcuta se encuentra en una estimación de exposición de inundación alta (3) correspondiente al 10% del departamento de NSA (UFPS 2018). Por esta razón se hace necesario implementar un modelo hidrológico e hidráulico 1D a través del programa SWMM (Este modelo ha sido especialmente desarrollado para la simulación de sistemas de desagües pluviales y cloacales en forma combinada o separada (Rossman 2010)) como se mencionó anteriormente, el cual permita conocer el comportamiento de las inundaciones por encharcamiento generadas en el tramo establecido del canal Bogotá corresponde a un drenaje natural seco que evacua las aguas lluvias de más del 60% del área urbana de Cúcuta (CORPONOR 2017), con el fin de establecer estrategias para mitigar los riesgos que

ocasionan las inundaciones. En donde un modelo o hidrológico, busca representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca (Jorquera, Weber, & Reyna, 2012) y la modelación hidráulica consiste en intentar conocer los valores de nivel, velocidad, caudal, régimen de flujo a partir de la resolución de métodos numéricos de las ecuaciones de Saint Venant (aguas someras), de Reynolds o de Navier-Stokes (Guarniz Muñoz, 2014).

Marco teórico

El estudio de la hidrología se basa en la comprensión del ciclo hidrológico, sus procesos e interrelaciones. Si bien existe una cantidad importante de métodos y técnicas de medición de caudal y precipitación que han evolucionado con el tiempo, existen otros componentes, como la infiltración, la percolación profunda y flujo subterráneo que, por la dificultad en su evaluación y modelación, no tuvieron los mismos avances. Por lo general son estimados de manera indirecta, lo que lleva a grandes incertidumbres con respecto a su conocimiento. (Cabrera, 2012). Las inundaciones pueden definirse como la ocupación por el agua de zonas o áreas que en condiciones normales se encuentran secas. Se producen debido al efecto del ascenso temporal del nivel del río, lago u otro. Existen diversos tipos de inundaciones, para este caso en particular se mencionarán las inundaciones por desbordamiento y encharcamiento. La primera de acuerdo con el Ministerio de Ambiente son las inundaciones lentas o de tipo aluvial, debido a que estas se producen por el desbordamiento del cauce anegando áreas planas aledañas al mismo y suelen ser originadas por crecidas progresivas y de larga duración (horas, días, o meses según la zona del país); el segundo tipo de inundación corresponde por fallas funcionales del sistema de alcantarillado, generalmente

se producen fallas estructurales como desempates o fracturas, subdimensionamiento de redes de alcantarillado o disposición incorrecta a emisarios finales (reflujo), colmatación por basuras, manejo inadecuado del drenaje de vías, etc. (IDIGER, 2023)

Según la organización meteorológica mundial OMM, las sequías, las tormentas y las inundaciones, todos fenómenos relacionados con el agua, dominan la lista de catástrofes de los últimos 50 años, tanto en términos de pérdidas humanas como económicas. De las 10 principales catástrofes registradas durante ese periodo, las que han provocado la mayor cantidad de víctimas han sido las sequías con 650.000 muertes; seguidas por las tormentas, con 577.232; las inundaciones, con 58.700; y las temperaturas extremas, con 55.736, según el próximo Atlas de esta agencia de la ONU sobre mortalidad y pérdidas económicas debidas a fenómenos meteorológicos, climáticos e hidrológicos extremos entre 1970-2019. La intervención humana ha venido ocasionando graves cambios climáticos a medida que la atmosfera se calienta, retiene más humedad, lo que conlleva a tener mayor frecuencia, intensidad y duración de las precipitaciones.

Drenaje urbano

Un sistema de drenaje urbano se encuentra compuesto por diferentes elementos, los cuales van desde la recolección de aguas pluviales hasta la canalización y transporte de estas hasta cuerpos de agua naturales y/o artificiales para su vertido final. El diseño correcto de este sistema de drenaje permitirá que en las diferentes precipitaciones con intensidad y duración variables se protejan las obras aledañas y se garantice el tránsito de manera segura de vehículos y peatones durante estas. (Departamento Nacional de Planeación).

EPA SWMM

El Modelo de Gestión de Aguas Pluviales (SWMM, por sus siglas en inglés) de la EPA se utiliza en todo el mundo para la planificación, el análisis y el diseño relacionados con la escorrentía de aguas pluviales, el alcantarillado combinado y sanitario, y otros sistemas de drenaje. Se puede utilizar para evaluar estrategias de control de aguas pluviales de infraestructura gris, como tuberías y desagües pluviales, y es una herramienta útil para crear soluciones rentables de control de aguas pluviales híbridas verdes/grises. SWMM fue desarrollado para ayudar a respaldar los objetivos locales, estatales y nacionales de gestión de aguas pluviales para reducir la escorrentía a través de la infiltración y la retención, y ayudar a reducir las descargas que causan el deterioro de los cuerpos de agua. SWMM es un programa de escritorio basado en Windows. Es un software público de código abierto y de uso gratuito en todo el mundo.

Figura 1

Representación de logotipo de herramienta computacional SWMM



Nota: La imagen fue tomada de Us Epa, O. W. (2018). EPA's stormwater management model (SWMM).

Modelación hidráulica

SWMM contiene un conjunto flexible de capacidades de modelado hidráulico que se utilizan para enrutar la escorrentía y las entradas externas a través de la red del sistema de drenaje de tuberías, canales, unidades de almacenamiento / tratamiento y estructuras de desvío. Estos incluyen la capacidad de hacer lo siguiente:

- Manejar redes de drenaje de tamaño ilimitado.
- Utilizar una amplia variedad de formas de conductos cerrados y abiertos estándar, así como canales naturales.
- Modelar elementos especiales, como desagües de entrada de calles, unidades de almacenamiento/tratamiento, divisores de flujo, bombas, vertederos y orificios
- Aplicar flujos externos y entradas de calidad del agua de la escorrentía superficial, el interflujo de agua subterránea, la infiltración/entrada dependiente de la lluvia, el flujo sanitario en clima seco y las entradas definidas por el usuario.
- Utilizar métodos de enrutamiento de flujo de onda cinemática o de onda dinámica completa.
- Modelar varios regímenes de flujo, como remanso, sobrecarga, flujo inverso y encharcamiento superficial. Aplicar reglas de control dinámico definidas por el usuario para simular el funcionamiento de las bombas, las aberturas de los orificios y los niveles de la cresta del vertedero.

Procesos hidrológicos

SWMM tiene en cuenta varios procesos hidrológicos que producen escorrentía de las áreas urbanas, que incluyen los siguientes:

- Reducción de la escorrentía a través de prácticas de infraestructura verde.
- Precipitación variable en el tiempo y evaporación de las aguas superficiales estancadas.
- Acumulación y derretimiento de nieve.
- Intercepción de lluvia a partir del almacenamiento de la depresión.
- Infiltración de la lluvia en las capas no saturadas del suelo.
- Percolación de agua infiltrada en capas de agua subterránea Interflujo entre las aguas subterráneas y el sistema de drenaje.
- Enrutamiento no lineal del reservorio del flujo terrestre.

La variabilidad espacial en todos estos procesos se logra dividiendo un área de estudio en una colección de subcuencas más pequeñas y homogéneas. Cada una de las áreas contiene su propia fracción de subáreas permeables e impermeables. El flujo superficial se puede enrutar entre subáreas, entre subcuencas o entre puntos de entrada de un sistema de drenaje (Us EPA, 2014).

Modelo de Nash-Sutcliffe

La eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es una métrica ampliamente reconocida en el modelado hidrológico para evaluar la precisión de un modelo comparado con los datos observados.

Introducida por Nash y Sutcliffe en 1970, el NSE es un estadístico normalizado que contrasta la varianza residual del modelo con la varianza de los datos medidos.

Los valores de NSE varían entre negativo infinito y 1. Un NSE de 1 indica que el modelo se ajusta perfectamente a los datos observados, mostrando una coincidencia total entre los valores

simulados y los observados. Un NSE de 0 sugiere que las predicciones del modelo son tan precisas como utilizar simplemente la media de los datos observados, mientras que valores negativos implican que la media de los datos observados predice mejor que el modelo.

En resumen, el NSE mide la alineación entre los datos simulados y los observados, con valores más altos reflejando un mejor rendimiento del modelo y una mayor proximidad a la línea 1:1 en un gráfico comparativo de datos observados y simulados.

Tabla 1
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).

Marco Legal

Tabla 2
Descripción de normas.

NORMA	DESCRIPCION
RAS 2000	Establece lineamientos para los elementos que conforman los alcantarillados de aguas residuales, lluvias y combinados como sistemas de recolección, manejo y evacuación de aguas residuales y/o lluvias, sus diferentes componentes y estaciones de bombeo.
Ley 1523 de 2012	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.
La Resolución 0330 de 2017 expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	“Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009”
Resolución 0799 de 2021	“Por la cual se modifica la Resolución 0330 de 2017”

Nota: La tabla fue de elaboración propia.

Marco Contextual

San José de Cúcuta, comúnmente conocida como Cúcuta, es la capital del departamento de Norte de Santander en Colombia. Ubicada en la frontera con Venezuela, la ciudad es de gran importancia estratégica y económica. Es conocida por su clima cálido y su rica historia.

La zona de estudio se encuentra ubicada en el nororiente de la ciudad de San José de Cúcuta N.S, en la avenida Guaimaral entre calle 9N y calle 20N, con coordenadas $7^{\circ}54'30,39''$ N $72^{\circ}29'31,39''$ O y $7^{\circ}54'54,88''$ N $72^{\circ}29'31,39''$ O.

Cuenta con uso de suelo ZR3 que, según el POT, es aquella de uso unifamiliar, bifamiliar y multifamiliar para grupos de pocos ingresos y con densidad alta

Extensión

Cúcuta abarca una extensión aproximada de 1,176 km², lo que la posiciona como una de las principales ciudades del noreste colombiano.

Límites

La ciudad limita al norte con Venezuela, al sur con el municipio de Villa del Rosario, al este con el municipio de Los Patios y al oeste con los municipios de El Zulia y San Cayetano.

Economía

La economía de Cúcuta se fundamenta en el comercio, especialmente con Venezuela debido a su posición fronteriza. También destacan la industria de la construcción, el sector manufacturero y los servicios. La ciudad es un importante centro de transporte y logística en la región.

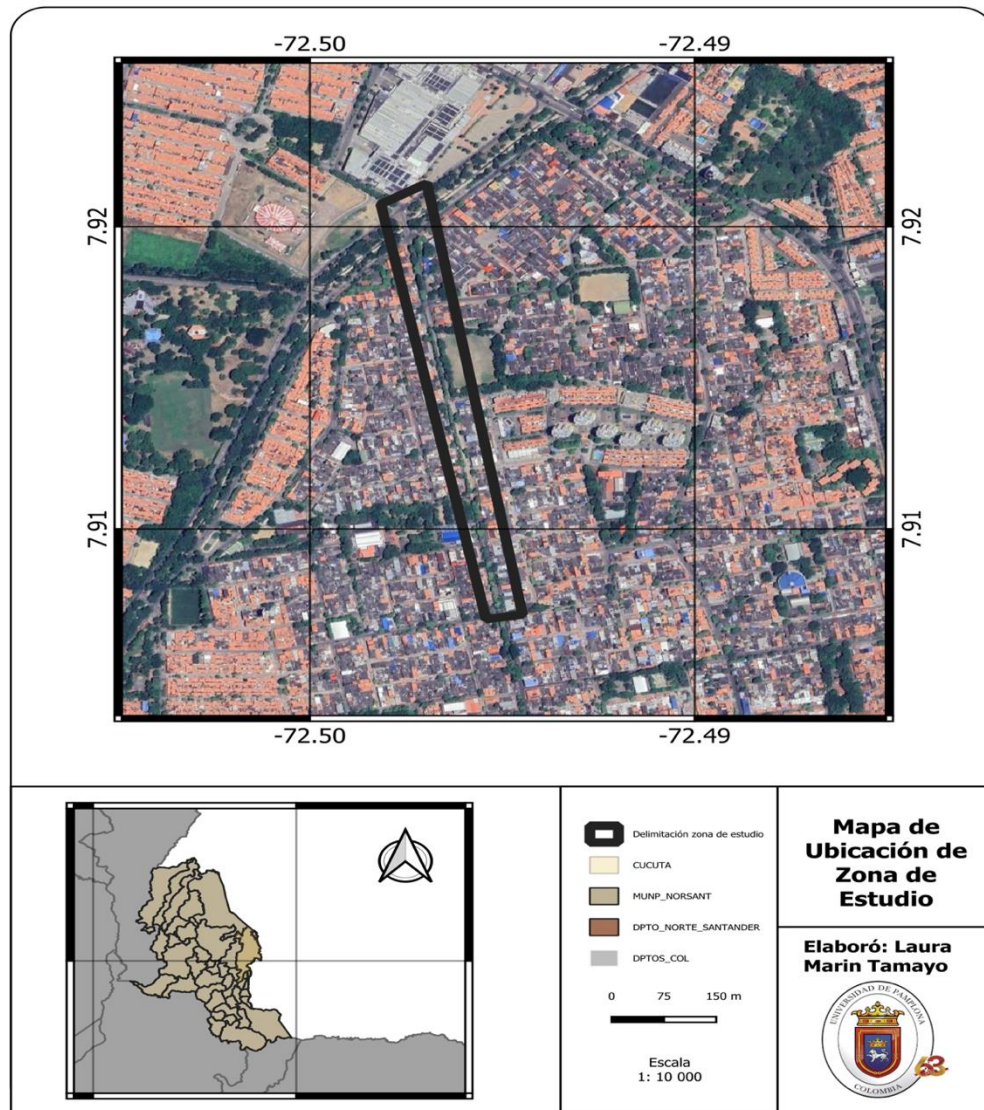
Demografía

Cúcuta cuenta con una población aproximada de 750,000 habitantes. La ciudad ha experimentado un crecimiento poblacional significativo, en parte debido a la migración de venezolanos que buscan mejores oportunidades económicas y sociales.

Cultura

Cúcuta es un crisol de culturas influenciado por su ubicación fronteriza. La ciudad celebra diversas fiestas y eventos culturales, como la Feria de Cúcuta y el Festival Internacional de la Frontera. Además, cuenta con sitios históricos como el Parque Grancolombiano y la Casa de Santander, que conmemoran su importancia en la independencia de Colombia y Venezuela.

Figura 2
Mapa de ubicación



Nota: El mapa presentado fue de elaboración propia.

METODOLOGÍA

Este proyecto de investigación se desarrolló mediante la ejecución de cuatro fases con el objetivo central de implementar un modelo hidrológico e hidráulico para evaluar el sistema de drenaje. A continuación, se definirá la metodología que se implementó.

1° Fase: Recopilación de la información primaria y secundaria.

Para la implementación de esta fase, fue necesario recolectar información existente del sistema de drenaje de la ciudad de San José de Cúcuta. Esto incluyó datos de precipitaciones mensuales y anuales de la zona, obtenidos de las estaciones pluviométricas del IDEAM. Además, se identificaron puntos de recolección (sumideros) mediante consultas en páginas web oficiales y recorridos virtuales con Google Earth PRO.

Información sobre el uso del suelo se obtuvo del Plan de Ordenamiento Territorial (POT), y se utilizaron el modelo digital de elevación (DEM) e imágenes ortomosaicas, datos observados de estudio que fueron proporcionados por el proyecto investigativo "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)".

2° Fase: Obtención de la lluvia de diseño

Se recopilaron datos de lluvia mensuales y anuales, los cuales fueron analizados utilizando Microsoft Excel. A través de estos cálculos, se determinó el tiempo de concentración, considerando únicamente el tiempo de entrada mediante la ecuación de la Administración Federal de Aviación (FAA) de los Estados Unidos, descrita a continuación:

$$Te = \frac{0.707*(1.1-C)*L^{\frac{1}{2}}}{S^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

Donde:

- Te es el tiempo de entrada dado en minutos
- C es el coeficiente de impermeabilidad adimensional.
- L es la longitud máxima de flujo de escorrentía superficial dado en metros.
- S es la pendiente promedio entre el punto más alejado y el punto de entrada de la red dado en metros por metro.

El cálculo de las curvas IDF se realizó mediante el método simplificado. Para una mayor confiabilidad de la ecuación (2), el país se dividió en cinco grandes zonas, permitiendo realizar análisis independientes con estaciones pertenecientes a la misma región.

$$i = \frac{a*T^b*M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c} \quad (2)$$

Donde:

- i es la precipitación.
- T el periodo de retorno.
- M la precipitación máxima promedio anual en 24 horas.
- t es la duración de lluvias.
- a, b, c, d son los parámetros de ajuste (se encuentran descritos en la tabla 4) de la regresión los cuales fueron regionalizados como se muestra en la figura 3.

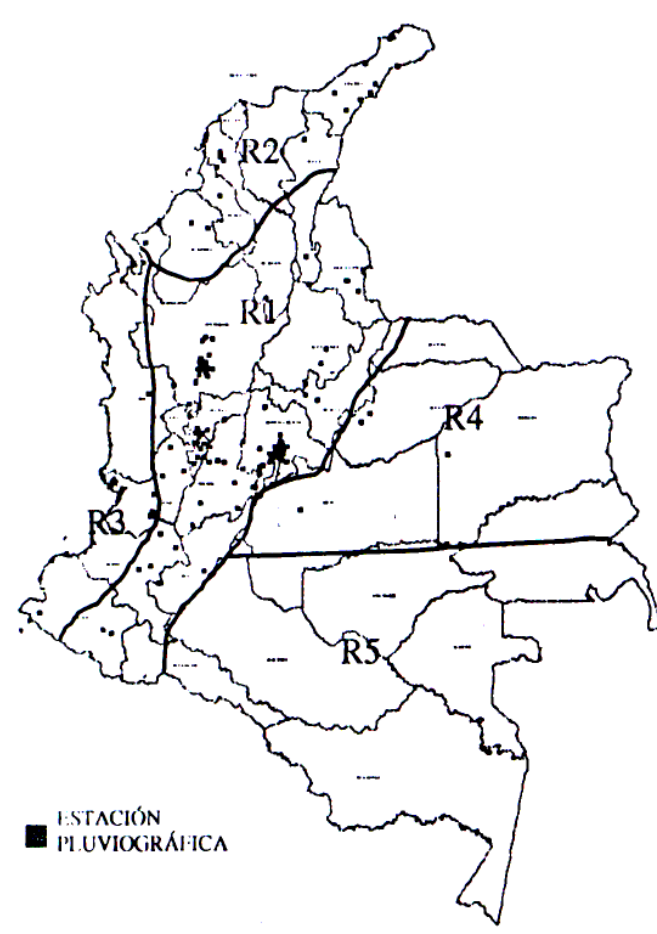
Para que para este caso la zona de estudio se encuentra en la región Andina R1.

Tabla 3
Valores de coeficientes a , b , c , d para el cálculo de las curvas IDF para Colombia

REGION	a	b	c	d
1	0.94	0.18	0.66	0.83
2	24.85	0.22	0.5	0.1
3	13.92	0.19	0.58	0.2
4	5.53	0.17	0.63	0.42

Nota: La tabla fue tomada de Ministerio de transporte, Instituto Nacional de Vías. (2009).

Figura 3
Regiones en Colombia para definición de parámetros a , b , c y d



Nota: La figura fue tomada de Ministerio de transporte, Instituto Nacional de Vías. (2009).

Después de obtener las curvas IDF, se procedió a la construcción de los hietogramas e hidrograma de salida por el método de los bloques alternos con la que se puede representar la distribución de la precipitación en una serie de intervalos temporales a lo largo del tiempo que dure la lluvia. Los datos fueron suministrados por la estación meteorológica del aeropuerto Camilo Daza de la ciudad de San José de Cúcuta y la estación de Tasajero. En estas estaciones se presentaron ausencias de registros mensuales, los cuales se generaron mediante el método del US National Weather Service. Este método considera que el dato faltante puede ser estimado en base a datos observados en estaciones circundantes mediante la siguiente ecuación:

$$P_x = \frac{\sum (P_i - W_i)}{\sum W_i} \quad (3)$$

Donde:

- P_i es el dato observado para la fecha faltante en las estaciones auxiliares (teniendo como mínimo dos).
- $W_i = \frac{1}{D^2}$ donde D es la distancia entre cada estación circundante y la estación incompleta.

3° Fase: Modelo computacional 1D de la zona de estudio

Con la información recopilada en la primera fase de esta investigación, se importaron los datos necesarios al software SWMM para la modelación hidrológica e hidráulica. Al ingresar estos datos en el modelo a una escala computacional detallada, incluyendo los valores específicos de cada nodo, tubería, desagüe y subcuenca, se pudo obtener el comportamiento del flujo dentro del sistema. Esto permitió una modelación inicial del sistema existente para evaluar el aumento del caudal del proyecto y proceder con su calibración.

Posteriormente, se llevó a cabo la modelación en el software para obtener los valores de caudal, velocidad y altura de la lámina de agua durante el evento de lluvia simulado. A continuación, se realizó un análisis de los datos obtenidos para asegurar la coherencia de los resultados y verificar que no hubiera errores de cálculo en la solución numérica debido a los parámetros de la cuenca registrados en el SWMM.

4° Fase: Evaluación del sistema de drenaje existente de la zona de estudio

Una vez construido el modelo computacional, se llevó a cabo una calibración utilizando datos suministrados por el proyecto investigativo "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)". Esto permitió verificar que el sistema urbano de drenaje representara correctamente su comportamiento, justificado con el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):

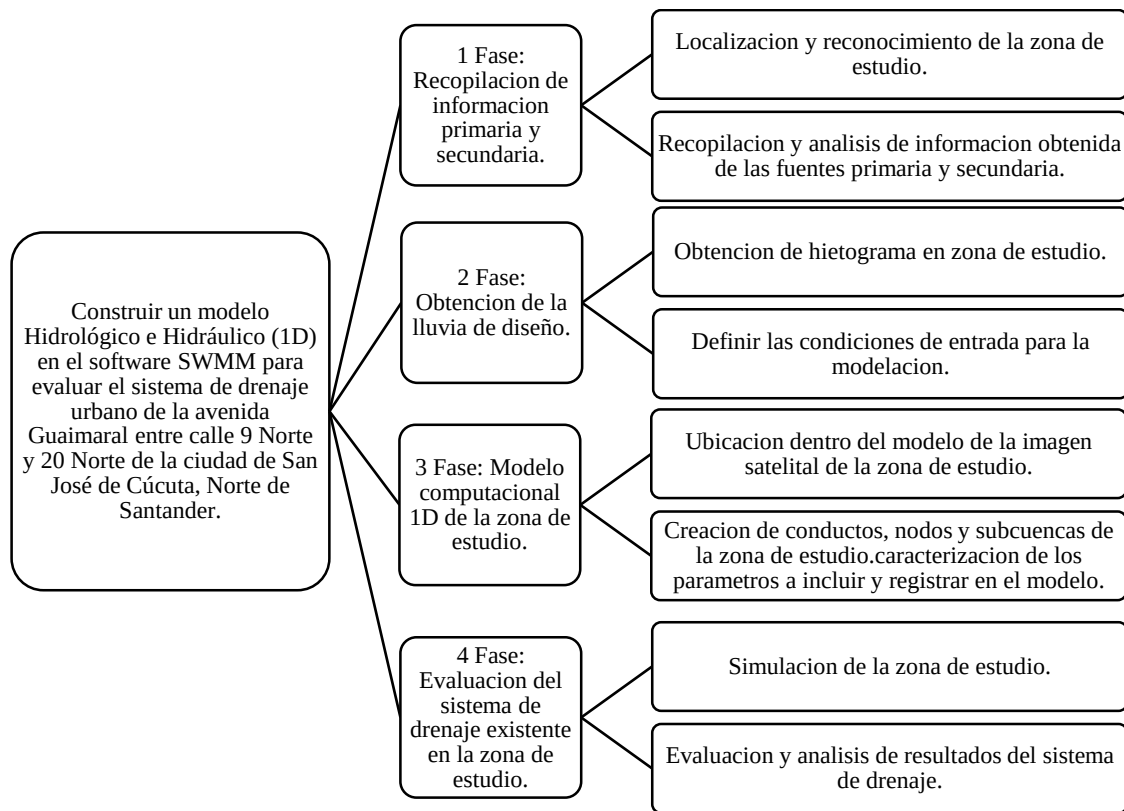
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^n (OBS_i - \overline{OBS})^2} \quad (4)$$

Donde:

- OBS_i representa los valores observados.
- SIM_i representa el valor de pronóstico.
- $\overline{OBS}$ denota el promedio de los valores observados.

La calibración se realizó utilizando datos de eventos de lluvias intensas en la zona, lo que permitió asegurar que los resultados obtenidos del modelo pudieran ser considerados con una alta tasa de confiabilidad.

Figura 4
Fases de metodología



Nota: La figura mostrada fue de elaboración propia.

RESULTADOS

Para comenzar, se consultó la base de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para obtener datos hidrometeorológicos, específicamente la precipitación mensual y la precipitación total anual, desde 1950 hasta 2023, de la estación Aeropuerto Camilo Daza, ubicada en la ciudad de San José de Cúcuta. Posteriormente, estos datos se exportaron al software Excel para verificar la ausencia de datos erróneos o faltantes que pudieran afectar la precisión de los resultados y el respectivo cálculo de estos con el método descrito del US National Weather Service, en la tabla 5 y 6 se muestran algunos resultados por motivos de apreciación de la tabla. En el apéndice B se encuentran los resultados completos.

Figura 5
Datos pluviométricos de la estación Aeropuerto Camilo Daza

CodigoEstacion	16015010												
NombreEstacion	AEROPUERTO CAMILO DAZA [16015010]												
Latitud	79.302.777.780												
Longitud	-7.250.916.667												
Altitud	250												
Categoria	Sinoptica Principal												

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ANUAL
1950	212,1	44,5	2,8	1,5	236,2	44,5	38,5	47,5	70,4	205,8	149,3	30,3	108,34
1951	100,8	183,7	21,8	145	77,9	7,9	3,1	0,1	18,4	35,1	27	44,5	66,53
1952	20,4	0,2	85,1	155,6	48,9	48,6	32	16,5	2	3,9	2,9	6,4	42,25
1953	2,1	2,2	1,6	2,4	2,9	2,6	1,5	2,5	46,8	24,1	5,1	32,1	12,59
1954	1,7	0,3	0,1	31,8	30,8	3,5	3	8,2	0,6	20,9	23,5	8,9	13,33
1955	15,7	21,6	25,9	12,8	13,2	10,9	1,8	3,9	4,3	33,5	2,8	8,8	15,52
1956	8,9	8,4	8,3	12,4	32	0,4	0,6	0,7	1,2	2,7	2,2	11,1	17,34
1964	32,7	28,3	18,4	35,6	34,7	19,9	24,7	28,7	24,7	35,8	41,2	32,9	7,34
1965	38	37,1	0,5	57,2	55,7	10,4	28,2	33,4	49,2	128,6	92,4	45,1	81,35
1966	0	1,8	24,2	45,6	62	36,9	12	6,4	24,1	137,6	222,1	166	73,25
1967	22,6	24,5	97,5	217,4	121,5	37,5	40,7	12,2	25,6	13,2	88,3	33	76,37
1968	95	35,7	6,4	160,3	117,6	95	25,9	35,7	58	106,1	41,8	36	94,11
1969	14,6	33,1	52,1	137,7	21,3	27,8	10,7	54,5	88	139	120,3	33,4	93,92
1970	10,9	39,4	35,8	16,1	57,1	8,8	18	7,6	146,2	148,7	238,1	37	102,35
1971	89,1	48,6	46,1	12	216,1	37,2	37,7	32,3	87,1	231,2	63,8	39,9	91,39
2012	52,3	5	55,7	145	144	13,8	44,5	15	12,7	206,1	44	16,5	41,65
2013	44,6	100,9	13,1	54,3	150,5	21,7	29,9	56	10,6	54,1	172,5	54,5	28,76
2014	19	18,2	55,2	46,1	98,8	42,5	22,7	20,9	34,8	47,2	172,7	4,6	33,54
2015	14,8	83,4	74,7	104,1	19,5	49,3	55,1	15,6	33,8	307,3	189,2	0	21,93
2019	67,6	124,4	153,5	80,6	111,8	80,7	23,2	14,6	40,7	53,2	50,8	37,5	76,83
2020	53,8	14,9	6,2	140,1	110,7	109	134,8	27,1	91,4	32,7	156,5	6,6	62,511791
2021	18,4	15,1	2,2	188,3	34,1	17,5	65,3	45,1	14,3	99	74,5	100,4	0
2022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	132,9	86,4	0
2023	13	8	67	126,3	81	27,7	38,6	36,8	42,7	196,9	50,1	80,2	0

MEDIOS	46,1	36,4	52,4	92,3	77,0	36,2	31,7	34,0	52,4	114,4	108,2	63,0	59,9
MAXIMOS	274,0	183,7	204,0	405,1	240,0	133,3	134,8	178,8	200,2	313,0	336,0	313,9	155,5
MINIMO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,2	0	0

Nota: En la figura se muestra un resumen de los datos, debido a que es una tabla extensa se presenta en el apéndice A con todos sus valores.

Figura 6
Datos pluviométricos de la estación Tasajero

CodigoEstacion	16010340												
NombreEstacion	TASAJERO [16010340]												
Latitud	79.930.277.780												
Longitud	-7.246.172.222												
Altitud	953												
Categoria	Pluviometrica												

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ANUAL
2010	0,2	35,9	56,2	173	241,3	84,2	240,6	339,3	574,1	245,4	630,6	385,5	3006,3
2011	250,5	226,6	0	240,5	267,5	148,7	72,5	58	102,3	161,2	284,6	252,7	2065,1
2012	245,4	51,3	162,1	366,6	148,4	45,3	29,6	18,9	1,3	224,7	58,4	25,7	1377,7
2013	13,9	221,1	31,6	94,4	150,9	54,2	6,3	48,6	21,9	0	0	0	642,9
2014	2,4	74,2	30,4	49,1	151,1	15,3	101	36,6	29,7	132,1	275	196,5	1093,4
2015	6,2	86,6	101,9	95,3	14,8	18,4	76,6	18,5	6,5	29,4	57,2	36	547,4
2016	26,6	54,9	0	229,8	63,6	18,9	5,5	117,1	8,5	87,8	293,3	182,4	1088,4
2017	59,1	51,7	58	109,3	53,2	53,6	86,5	29,2	33,8	307,3	189,2	0	1030,9
2018	26,8	241,2	60,7	107,8	7,2	12,2	19,6	17,6	34,7	287,6	127,9	26,2	969,5
2019	28,3	7,1	49,5	86,9	75,2	26,1	20,6	17,2	169,3	115	169,5	117,5	882,2
2020	74,5	31,3	57,5	15,9	93,1	56,8	30,5	66,6	125,5	109,5	226,1	29,1	916,4
2021	11,9	124,4	153,5	80,6	111,8	80,7	49,7	105,8	49,5	166,3	56,2	27,3	1017,7
2022	53,8	83,2	146,4	140,1	110,7	109	134,8	57,8	59,6	243,1	317,6	178,5	1634,6
2023	147,4	8,5	93,3	188,3	34,1	17,5	65,3	45,1	14,3	99	74,5	100,4	887,7

MEDIOS	67,6	92,7	71,5	141,3	108,8	52,9	67,1	69,7	87,9	157,7	197,2	111,3	1225,7
MAXIMOS	250,5	241,2	162,1	366,6	267,5	148,7	240,6	339,3	574,1	307,3	630,6	385,5	3006,3
MINIMOS	0,2	7,1	0	15,9	7,2	12,2	5,5	17,2	1,3	0	0	0	547,4

Nota: En la figura se muestra un resumen de los datos, debido a que es una tabla extensa se presenta en el apéndice A con todos sus valores.

Seguidamente, utilizando el Manual de Drenaje para Carreteras (2009), se emplearon los datos previamente revisados en Excel para calcular las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) mediante el método simplificado, considerando períodos de retorno de 3, 5, 10, 50 y 100 años. Donde se toma la región Andina R1 que tiene los siguientes valores:

Tabla 4
Selección de región

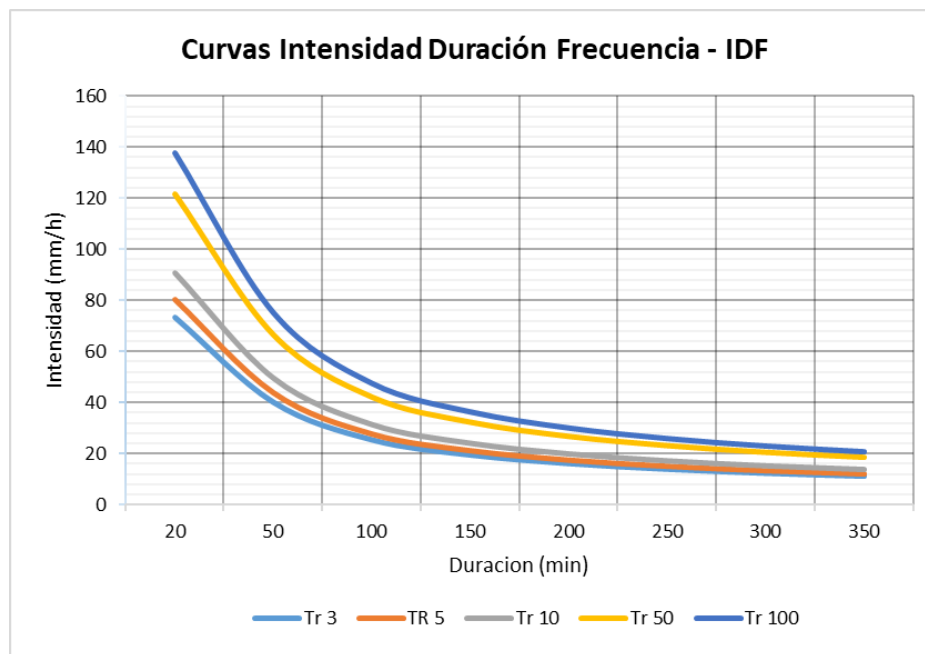
REGION	1
a	0.94
b	0.18
c	0.66
d	0.83

Además, se procedió al cálculo del tiempo de concentración, utilizando la ecuación de la Administración Federal de Aviación para determinar el tiempo de entrada (en minutos) en el canal evaluado.

$$T_e = \frac{0.707 * (1.1 - 0.9) * (771.78 \text{ m})^{\frac{1}{2}}}{\left(0.01861 \frac{\text{m}}{\text{m}}\right)^{\frac{1}{2}}} = 28.795 \text{ minutos}$$

Las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) resultan de unir puntos representativos e intensidad media de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia asociada a un periodo de retorno (Temez Pelaez, 1978).

Figura 7
Curvas IDF



Con base en las curvas IDF obtenidas, se establecieron la duración de la tormenta (en horas), la intensidad de la lluvia (en mm/h), la precipitación en 24 horas (en mm) y los intervalos de tiempo

(en minutos), necesarios para el cálculo de los hietogramas de tormenta para los diferentes períodos de retorno, utilizando el método de bloques alternos.

Para un periodo de retorno de 3 años, el hietograma de precipitación mostrado en la figura 9, inicia en 0 mm en el minuto 0. Alrededor del minuto 5, la precipitación alcanza aproximadamente 20 mm. Se incrementa significativamente hasta alrededor de 120 mm en el minuto 15.

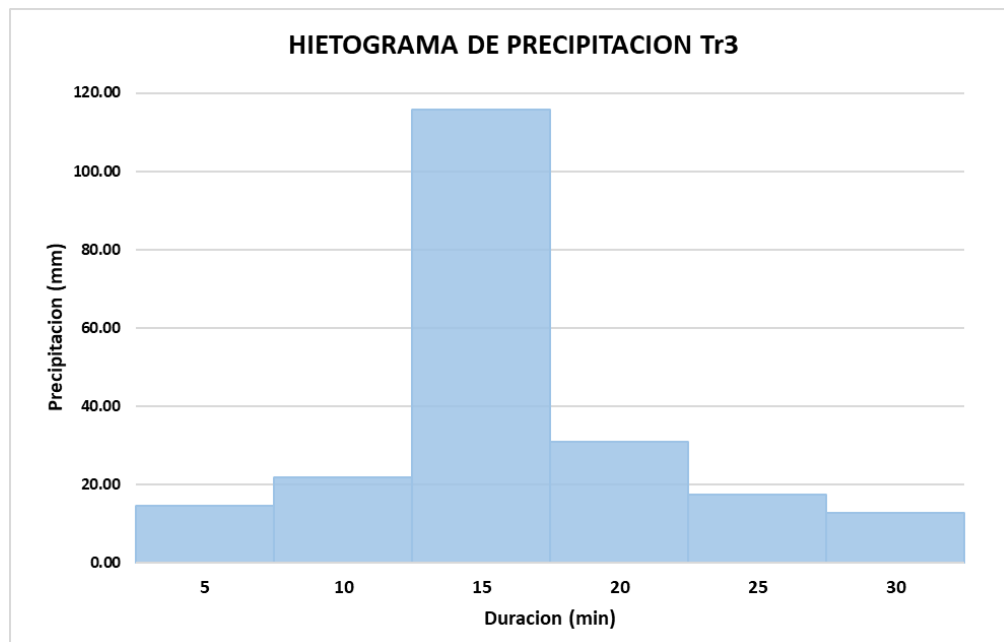
Después del pico en el minuto 15, la precipitación disminuye, bajando a aproximadamente 60 mm en el minuto 20. Continúa disminuyendo progresivamente hasta alcanzar 20 mm alrededor del minuto 25.

Finalmente, la precipitación disminuye nuevamente a 0 mm en el minuto 30. La gráfica muestra un evento de lluvia con una intensidad máxima en el minuto 15. La mayor parte de la lluvia ocurre en un periodo corto de tiempo, alrededor de la marca de 15 minutos. La precipitación disminuye gradualmente después del pico.

Figura 8
Cálculos TR3

Duración de tormenta (h)		0,5				
Intensidad de lluvia (mm/h)		10,87				
Precipitación en 24h (mm)		5,435				
Intervalos de tiempo (min)		5				
INSTANTE (min)	INTENSIDAD (mm/h)	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)	PRECIPITACION (mm)	INTENSIDAD PARCIAL (mm/h)	PRECIPITACION ALTERNADA (mm)	INTE. PARCIAL ALTERNADA (mm)
5	115,67	9,64	9,64	115,67	14,63	175,56
10	73,21	12,20	2,56	30,75	21,64	259,68
15	56,02	14,01	1,80	21,64	115,67	1388,04
20	46,33	15,44	1,44	17,26	30,75	369,00
25	39,99	16,66	1,22	14,63	17,26	207,12
30	35,45	17,73	1,06	12,75	12,75	153,00

Figura 9
Hietograma TR3



Para un periodo de retorno de 5 años, la precipitación inicia en 0 mm en el minuto 0. Alrededor del minuto 1, la precipitación alcanza aproximadamente 20 mm. Se incrementa significativamente hasta alrededor de 120 mm en el minuto 3. Después del pico en el minuto 3, la precipitación disminuye, bajando a aproximadamente 60 mm en el minuto 4. Continúa disminuyendo progresivamente hasta alcanzar 20 mm alrededor del minuto 5. Finalmente, la precipitación disminuye nuevamente a 0 mm en el minuto 6.

Comparado con TR3 el evento de lluvia en Tr5 es mucho más corto en comparación con Tr3 (6 minutos frente a 30 minutos). Ambos hietogramas muestran una intensidad máxima de precipitación alrededor de 120 mm. En Tr5, la lluvia alcanza su pico muy rápidamente y disminuye casi igual de rápido, mientras que en Tr3, la precipitación aumenta y disminuye de manera más gradual.

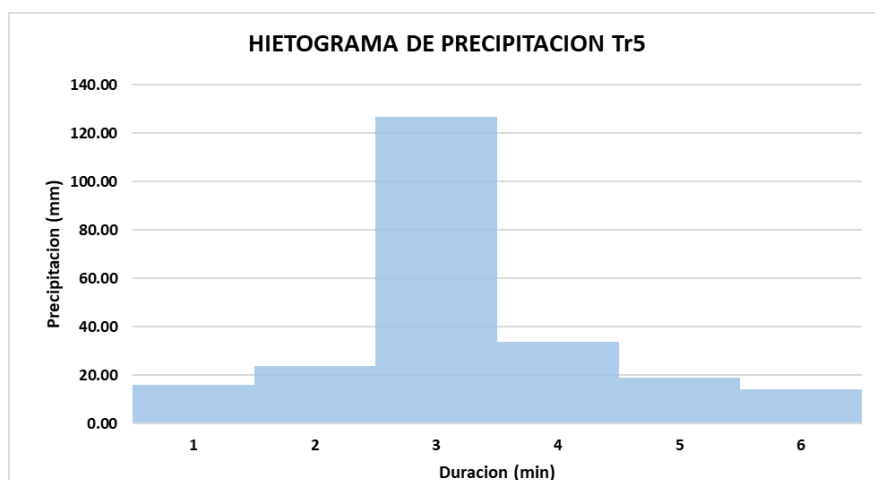
La gráfica muestra un evento de lluvia muy intenso, pero de corta duración, alcanzando su punto máximo rápidamente en el minuto 3. La mayor parte de la lluvia ocurre en un periodo muy corto de tiempo, similar al hietograma de Tr3 pero en una escala temporal más reducida.

Figura 10
Cálculos TR5

Duración de tormenta (h)	0,5
Intensidad de lluvia (mm/h)	11,91
Precipitación en 24h (mm)	5,955
Intervalos de tiempo (min)	5

INSTANTE (min)	INTENSIDAD (mm/h)	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)	PRECIPITACION (mm)	INTENSIDAD PARCIAL (mm/h)	PRECIPITACION ALTERNADA (mm)	INTE. PARCIAL ALTERNADA (mm)
5	126,82	10,57	10,57	126,82	16,04	192,48
10	80,26	13,38	2,81	33,70	23,71	284,52
15	61,41	15,35	1,98	23,71	126,82	1521,84
20	50,79	16,93	1,58	18,93	33,70	404,40
25	43,84	18,27	1,34	16,04	18,93	227,16
30	38,87	19,44	1,17	14,02	14,02	168,24

Figura 11
Hietograma TR5



Para un periodo de retorno de 10 años, la precipitación inicia en 0 mm en el minuto 0. Alrededor del minuto 1, la precipitación alcanza aproximadamente 20 mm. Se incrementa significativamente

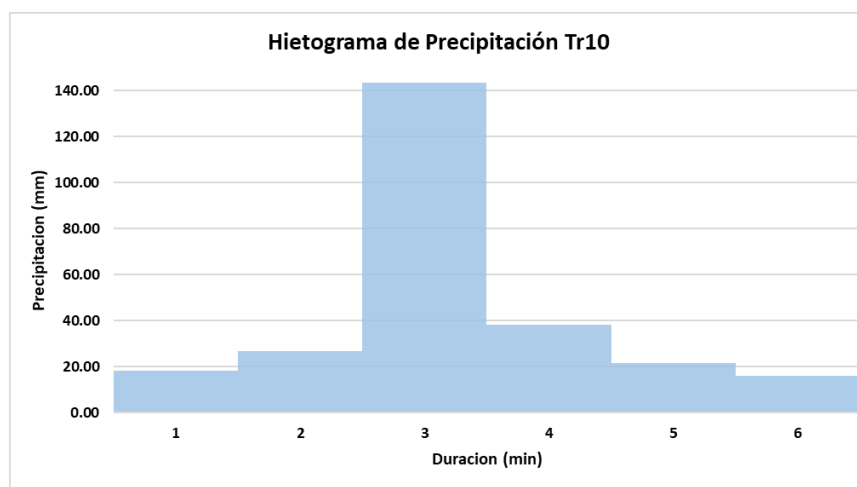
hasta alrededor de 140 mm en el minuto 3. Después del pico en el minuto 3, la precipitación disminuye, bajando a aproximadamente 60 mm en el minuto 4. Continúa disminuyendo progresivamente hasta alcanzar 20 mm alrededor del minuto 5. Finalmente, la precipitación disminuye nuevamente a 0 mm en el minuto 6.

Comparando con TR3 y TR5, el evento de lluvia de TR10 tiene duración similar a TR5. El pico de precipitación en Tr10 es de 140 mm, ligeramente más alto que en Tr5 y Tr3 (120 mm).

Figura 12
Cálculos TR10

Duracion de tormenta (h)		0,5				
Intensidad de lluvia (mm/h)		13,5				
Precipitacion en 24h (mm)		6,75				
Intervalos de tiempo (min)		5				
INSTANTE (min)	INTENSIDAD (mm/h)	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)	PRECIPITACION (mm)	INTENSIDAD PARCIAL (mm/h)	PRECIPITACION ALTERNADA (mm)	INTE. PARCIAL ALTERNADA (mm)
5	143,67	11,97	11,97	143,67	18,14	217,68
10	90,92	15,15	3,18	38,17	26,90	322,80
15	69,58	17,40	2,24	26,90	143,67	1724,04
20	57,54	19,18	1,79	21,42	38,17	458,04
25	49,66	20,69	1,51	18,14	21,42	257,04
30	44,03	22,02	1,32	15,88	15,88	190,56

Figura 13
Hietograma TR10

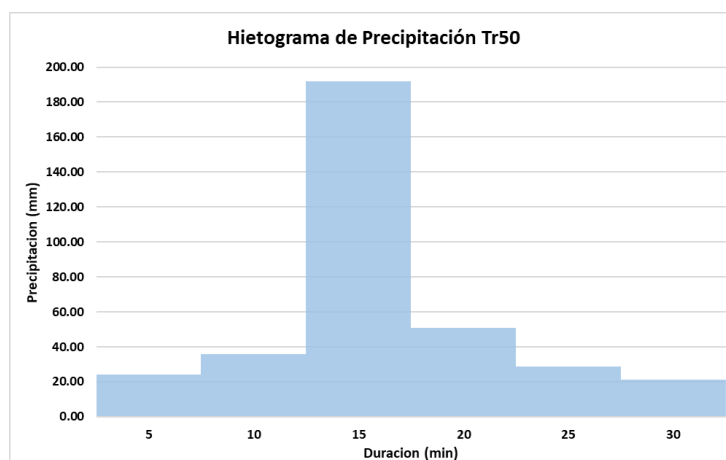


Para un periodo de retorno de 50 años, la precipitación comienza alrededor de los 5 minutos con un valor inicial bajo, aproximadamente 20 mm. A los 10 minutos, la precipitación se incrementa ligeramente a unos 40 mm. El pico máximo de precipitación se observa a los 15 minutos, alcanzando cerca de 180 mm. Esto indica un evento de precipitación muy intensa en un corto período de tiempo. Después del pico máximo, la precipitación disminuye significativamente a unos 60 mm a los 20 minutos. A los 25 minutos, la precipitación vuelve a bajar a alrededor de 20 mm, manteniéndose en este nivel hasta los 30 minutos.

Figura 14
Cálculos TR50

Duracion de tormenta (h)		0,5				
Intensidad de lluvia (mm/h)		18,03				
Precipitacion en 24h (mm)		9,015				
Intervalos de tiempo (min)		5				
INSTANTE (min)	INTENSIDAD (mm/h)	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)	PRECIPITACION (mm)	INTENSIDAD PARCIAL (mm/h)	PRECIPITACION ALTERNADA (mm)	INTE. PARCIAL ALTERNADA (mm)
5	191,94	16,00	16,00	191,94	24,23	290,76
10	121,48	20,25	4,25	51,02	35,89	430,68
15	92,95	23,24	2,99	35,89	191,94	2303,28
20	76,88	25,63	2,39	28,67	51,02	612,24
25	66,35	27,65	2,02	24,23	28,67	344,04
30	58,83	29,42	1,77	21,23	21,23	254,76

Figura 15
Hietograma TR50



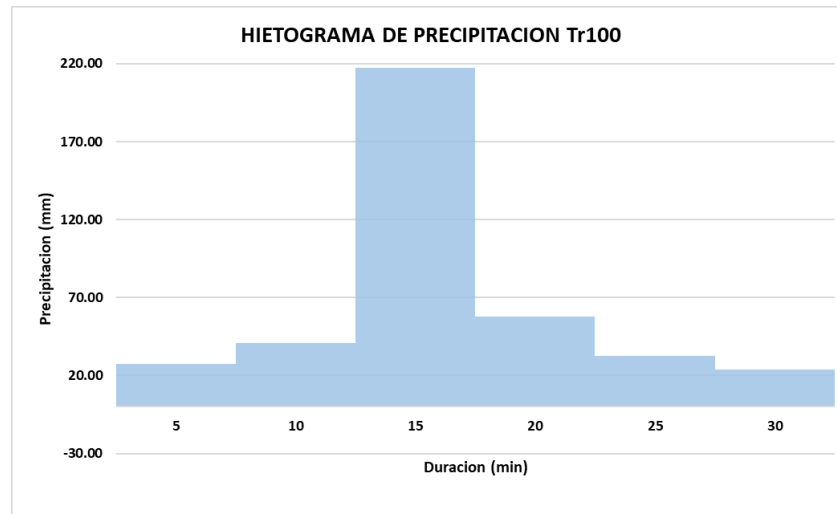
Para un periodo de retorno de 100 años, la precipitación comienza alrededor de los 5 minutos con un valor inicial bajo, aproximadamente 20 mm. A los 10 minutos, la precipitación se incrementa ligeramente a unos 40 mm. El pico máximo de precipitación se observa a los 15 minutos, alcanzando cerca de 200 mm. Esto indica un evento de precipitación muy intensa en un corto período de tiempo. Después del pico máximo, la precipitación disminuye significativamente a unos 60 mm a los 20 minutos. A los 25 minutos, la precipitación vuelve a bajar a alrededor de 20 mm, manteniéndose en este nivel hasta los 30 minutos.

En comparación con TR50, el evento de Tr100 muestra una mayor intensidad máxima de precipitación en comparación con Tr50. La distribución temporal de la precipitación es similar, con una precipitación máxima en el medio del período y disminución hacia el final.

Figura 16
Cálculos TR100

Duración de tormenta (h)		0,5				
Intensidad de lluvia (mm/h)		20,43				
Precipitación en 24h (mm)		10,215				
Intervalos de tiempo (min)		5				
INSTANTE (min)	INTENSIDAD (mm/h)	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)	PRECIPITACION (mm)	INTENSIDAD PARCIAL (mm/h)	PRECIPITACION ALTERNADA (mm)	INTE. PARCIAL ALTERNADA (mm)
5	217,45	18,12	18,12	217,45	27,45	329,40
10	137,62	22,94	4,82	57,79	40,69	488,28
15	105,31	26,33	3,39	40,69	217,45	2609,40
20	87,10	29,03	2,71	32,47	57,79	693,48
25	75,17	31,32	2,29	27,45	32,47	389,64
30	66,65	33,33	2,00	24,05	24,05	288,60

Figura 17
Hietograma TR100



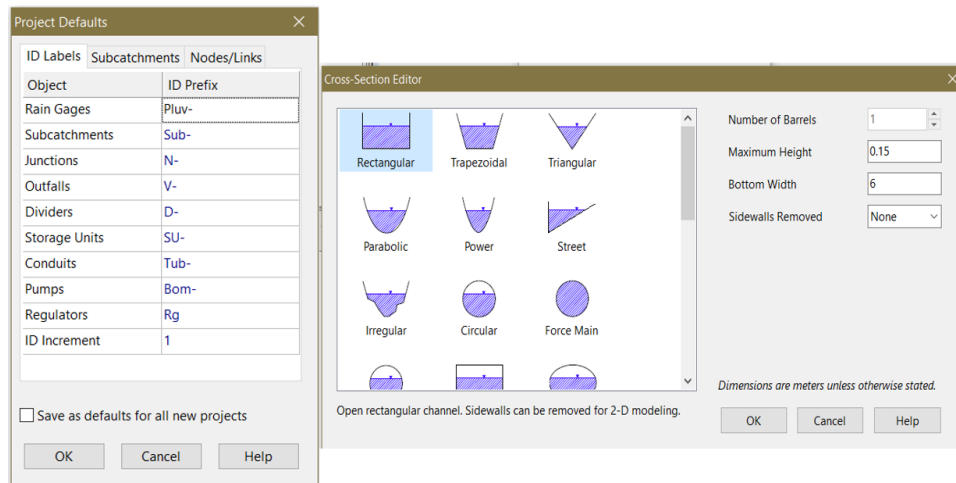
En el software QGIS, se utilizó una imagen ortomosaica proporcionada por la tesis de maestría “Cuantificación de la peligrosidad en peatones por inundaciones de origen pluvial en cuan a urbanas usando lenguaje de programación Python y el modelo de gestión de aguas pluviales (SWMM)” de la zona de estudio como mapa base. A partir de este ortomosaico, se generaron capas en formato .shp que representan la creación de pozos de manera aleatoria, subcuencas y longitudes de canales abiertos. En una primera etapa, estas capas se emplearon para la creación preliminar de la red de drenaje en el software SWMM.

Figura 18
Ubicación de pozos



En el software SWMM, se configuraron los valores por defecto requeridos, tales como lluvias de drenaje, pendiente media, subcuencas, pozos, salidas, conductos y el modelo de infiltración a utilizar, que en este caso fue el Número de Curva. Luego se procedió a la creación de las subcuencas de drenaje y las secciones de tubería, que, en este caso, al ser una red de drenaje, se designaron como canales rectangulares abiertos con altura de 0.15 (que hace alusión a la altura del andén peatonal) y el ancho de este era variable ya que dependía de la vía que se estuviera diseñando.

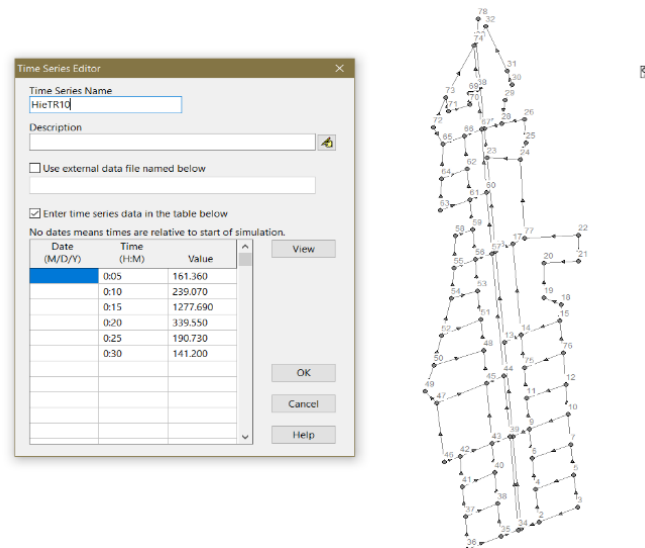
Figura 19
Valores por defecto



Se crearon series de tiempo para los diferentes períodos de retorno (TR 3, TR 5, TR 10, TR 50 y TR 100) a los cuales se ingresaron los datos previamente calculados de precipitación alternada con sus respectivos intervalos de tiempo.

El pluviómetro se añadió al proyecto, ingresando el formato de lluvia como volumen y utilizando la fuente de datos suministrada en formato TIMESERIES como se muestra en la figura 20.

Figura 20
Creación de TimeSeries



Para cada subcuenca la cual se define como las manzanas presentes en la zona de estudio, se ajustaron características como el pluviómetro 1 (RAIN GAGE), la descarga de cada uno de los diferentes pozos, el ancho de cada subcuenca el cual era variable, el porcentaje de impermeabilidad que se obtuvo de realizar la siguiente ecuación para cada una de las subcuencas

$$\% \text{ impermeabilidad} = \frac{A_{\text{impermeable}}}{A_{\text{subcuenca}}} * 100 \quad (5)$$

El coeficiente N de Manning para superficies permeables e impermeables el cual se obtuvo de la tabla 13, tomando como valores promedios para N-imperv para un canal revestido de hormigón de 0.015 y para N-perv para canal revestido de vegetación de 0.035.

Tabla 5
Valores del coeficiente n de Manning para flujo en canales abiertos.

Material del conducto	n
<i>Canales revestidos</i>	
De asfalto	0.013-0.017
De ladrillo	0.012-0.018
De hormigon	0.011-0.020
De escombros	0.020-0.035
De vegetacion	0.03-0.04
<i>Excavado o en zanja</i>	
En tierra, recto y unidorme	0.02-0.030
En tierra, con curvas o no uniforme	0.025-0.040
En roca	0.030-0.045
Sin mantenimiento	0.05-0.14
<i>Canales o cauces naturales</i>	
Seccion mas o menos regular	0.03-0.07
Seccion irregular con charcos	0.04-0.1

El valor del Número de Curva (CN), que varía según el uso del suelo o tipo de suelo, se obtuvo de la tabla 5 En esta tabla, se seleccionó el tipo de suelo de cada subcuenca. Luego, de la tabla 6, se tomó el valor correspondiente a cada subcuenca según la descripción específica de cada una de ellas.

Tabla 6
Definiciones de tipo de suelo

Tipo	Descripcion
A	Bajo potencial de escorrentia.
B	Suelos con tasa de infiltracion media cuando estan completamente mojados.
C	Suelos con tasa de infiltracion baja cuando estan completamente mojados.
D	Alto potencial de escorrentia.

Nota: La tabla fue tomada de SWMM Modelo de Gestion de Aguas Pluviales 5.1 Manual de usuario.

Tabla 7
Numero de curva para escorrentía (CN) según el SCS

Descripcion del uso de suelo	Tipo de suelos			
	A	B	C	D
<i>Tierra cultivada</i>				
Sin tratamiento de conservacion	72	81	88	91
Con tratamiento de conservacion	62	71	78	81
<i>Pastos y prados</i>				
En malas condiciones	68	79	86	89
En buenas condiciones	39	61	74	80
<i>Pradera</i>				
En buenas condiciones	30	58	71	78
<i>Terreno boscoso</i>				
Poco denso, cubierta forestal pobre o inexistente	45	66	77	83
Buena cubierta forestal	25	55	70	77
<i>Espacios abiertos (cesped, parques, campos de golf, cementerios, etc)</i>				
En buenas condiciones (75% o mas de hierba)	39	61	74	80
En pobres condiciones (50-75% o mas de hierba)	49	69	79	84
<i>Zonas comerciales (85% impermeable)</i>	89	92	94	95
<i>Poligonos industriales (72% impermeable)</i>	81	88	91	93
<i>Zona residencial</i>				
Tamaño medio de la parcela (%impermeabilidad				
< 500 m2 (65%)	77	85	90	92
1000 m2 (38%)	61	75	83	87
1500 m2 (30%)	57	72	81	86
2000 m2 (25%)	54	70	80	85
4000 m2 (20%)	51	68	79	84
<i>Aparcamientos pavimentados, tejados, caminos asfaltados, etc.</i>	98	98	98	98
<i>Calles y carreteras</i>				
Pavimentados, con cunetas y colectores de drenaje	98	98	98	98
Caminos de grava	76	85	89	91
Sucios	72	82	87	89

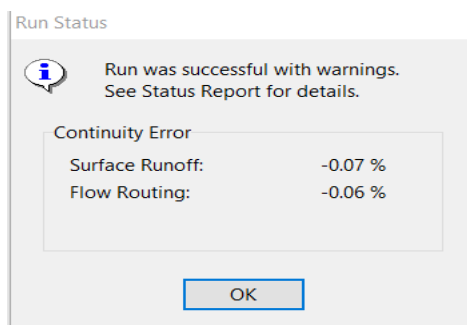
Nota: la tabla fue tomada de la tabla fue tomada de SWMM Modelo de Gestion de Aguas Pluviales 5.1 Manual de usuario.

Se crearon los conductos (CONDUITS) como un circuito cerrado entre pozos, teniendo en cuenta el sentido del flujo de agua según la altura de cada pozo.

Finalmente, se obtuvieron 132 subcuencas, 77 pozos, y 113 conductos (sección de canal rectangular abierto), con unidad de flujo LPS, flujo de enrutamiento (FLOW ROUTING) como onda dinámica y una descarga que se denominó Outfall 78.

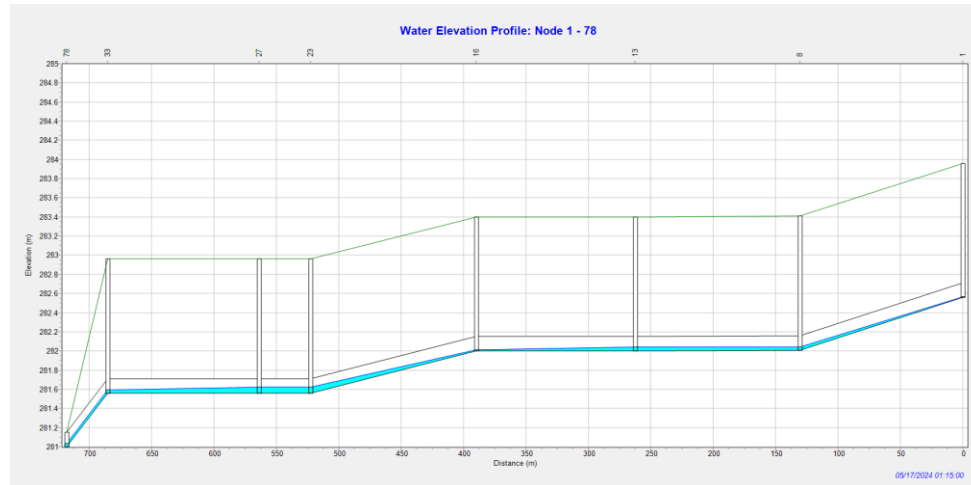
Con el fin de verificar que todos los datos suministrados al modelo estuviesen correctos, se procedió a ejecutar el modelo, que indicó un error por debajo del 1% en el balance de continuidad de flujo y escorrentía.

Figura 21
Porcentaje de error en el modelo



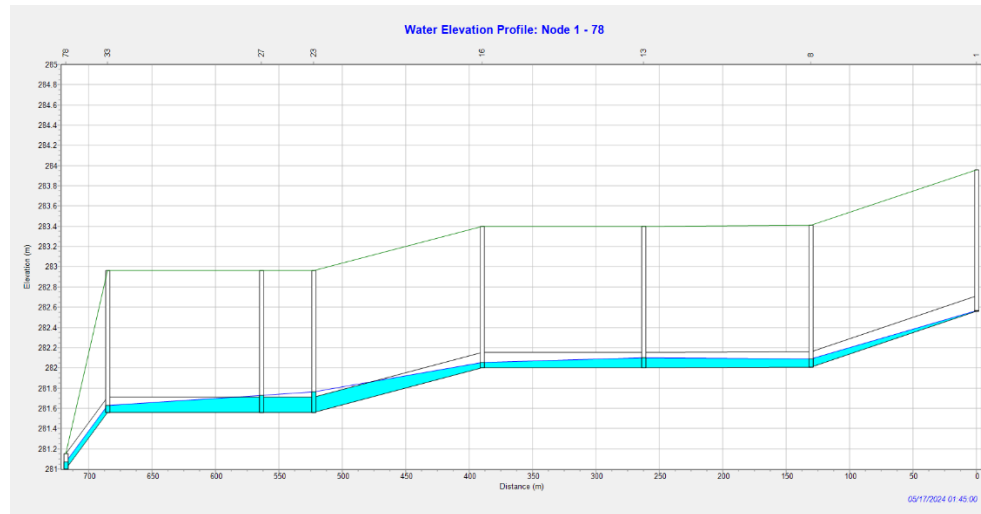
En las figuras 22 y 23 se evidencia el correcto funcionamiento del software modelo SWMM para la ruta de los nodos 1-8-13-16-23-27-33-78 en dos tiempos diferentes.

Figura 22
Simulación sin niveles de inundación



Nota: Esta figura fue tomada del modelo en SWMM para un tiempo transcurrido de 1 hora y 15 minutos, evidenciando que en ninguno de los pozos se haya presentado alturas de lámina de agua superiores al andén.

Figura 23
Simulación con niveles de inundación



Nota: Esta figura fue tomada del modelo en SWMM para un tiempo transcurrido de 1 hora y 45 minutos, evidenciando que para el pozo 23 y 27 se ha presentado una lámina de agua mayor a la altura que tiene el andén, ocasionando una inundación en esta zona.

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 24
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)

El criterio NSE arrojó un resultado de 0.999, valor que, según la literatura introducida por Nash y Sutcliffe observando la tabla 1, se considera una calibración excelente, ya que supera el umbral de 0.8. De acuerdo con el criterio de calibración de Nash-Sutcliffe, este valor sugiere que las predicciones del modelo son extremadamente precisas, incluso más que simplemente usar la media de los datos observados.

Tabla 8
Calculo del coeficiente Nash y Sutcliffe para verificación del modelo realizado.

Datos reales	Datos calculados	Datos reales	Datos calculados
(m)	(m)	(m)	(m)
0.00	0	0.07	0.07
0.00	0	0.07	0.07
0.00	0	0.06	0.06
0.00	0	0.06	0.06
0.00	0	0.05	0.05
0.00	0	0.05	0.05
0.00	0	0.05	0.05
0.02	0	0.05	0.05
0.03	0.01	0.04	0.05
0.02	0.01	0.04	0.05
0.03	0.01	0.04	0.04
0.04	0.02	0.04	0.04
0.04	0.02	0.04	0.04
0.04	0.03	0.04	0.04
0.04	0.03	0.04	0.04
0.04	0.04	0.04	0.04
0.05	0.04	0.03	0.04
0.06	0.05	0.03	0.03
0.07	0.06	0.03	0.02
0.07	0.06	0.03	0.02
		0.03	0.01
Coeficiente NSE			0.999

Nota: La tabla fue de elaboración propia,

Tabla 9

Tiempo transcurrido y su respectiva profundidad en el pozo 16 para datos reales Vs datos simulados

Hora	Datos reales	Datos simulados	Hora	Datos reales	Datos simulados
	(m)	(m)		(m)	(m)
19:00:00	0.000	0.000	20:40:00	0.072	0.070
19:05:00	0.000	0.000	20:45:00	0.069	0.070
19:10:00	0.000	0.000	20:50:00	0.061	0.060
19:15:00	0.000	0.000	20:55:00	0.057	0.060
19:20:00	0.000	0.000	21:00:00	0.054	0.050
19:25:00	0.000	0.000	21:05:00	0.052	0.050
19:30:00	0.000	0.000	21:10:00	0.049	0.050
19:35:00	0.018	0.000	21:15:00	0.046	0.050
19:40:00	0.031	0.010	21:20:00	0.043	0.050
19:45:00	0.024	0.010	21:25:00	0.041	0.050
19:50:00	0.026	0.010	21:30:00	0.039	0.040
19:55:00	0.040	0.020	21:35:00	0.038	0.040
20:00:00	0.043	0.020	21:40:00	0.037	0.040
20:05:00	0.044	0.030	21:45:00	0.036	0.040
20:10:00	0.044	0.030	21:50:00	0.036	0.040
20:15:00	0.045	0.040	21:55:00	0.035	0.040
20:20:00	0.049	0.040	22:00:00	0.034	0.040
20:25:00	0.059	0.050	22:05:00	0.033	0.030
20:30:00	0.068	0.060	22:10:00	0.032	0.020
20:35:00	0.072	0.060	22:15:00	0.031	0.020
			22:20:00	0.030	0.010

Nota: La tabla fue de elaboración propia

A continuación, se presentan los mapas de velocidad. En las figuras 25 y 26 se observan los periodos de retorno de 3, 5 y 10 años, proporcionando una visualización de las velocidades del flujo, mayormente entre 0.01 y 1.0 m/s. Esto indica que la zona es plana, corroborado por una pendiente media de la cuenca inferior al 2%. Esta condición puede llevar a la generación de sedimentos durante las precipitaciones, reduciendo la capacidad del sistema de drenaje.

La figura 27 muestra los mapas de velocidad para periodos de retorno de 50 y 100 años, donde las velocidades son más intensas, oscilando entre 0.10 y 2.0 m/s.

En la intersección de las calles 11 Norte y 11A Norte, durante los periodos de retorno de 10, 50 y 100 años, se registra una velocidad de flujo de 2.0 m/s. En el pozo 33, a la descarga realizada en el canal de Bogotá, también se observa esta velocidad de 2.0 m/s debido a una diferencia de elevación mayor a 1 metro, lo que incrementa la velocidad en ese tramo.

Las secciones de la avenida 10A Este, delimitada por las calles 10A Norte y 11 Norte, avenida 10A Este hasta la calle 12B Norte, avenida 13 Este y calle 13 Norte, son las únicas que presentan velocidades menores a 0.01 m/s para los periodos de retorno mencionados en la figura 27.

Las velocidades altas y bajas están distribuidas en áreas específicas, reflejando las variaciones en la topografía e infraestructura de la subcuenca.

Figura 25
Mapa de velocidad para TR3 transcurridos 30 min

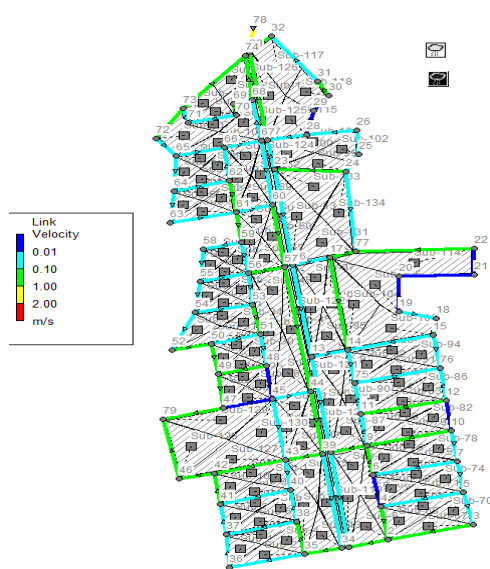


Figura 26
Mapa de velocidad para TR5 y TR10 transcurridos 30 min

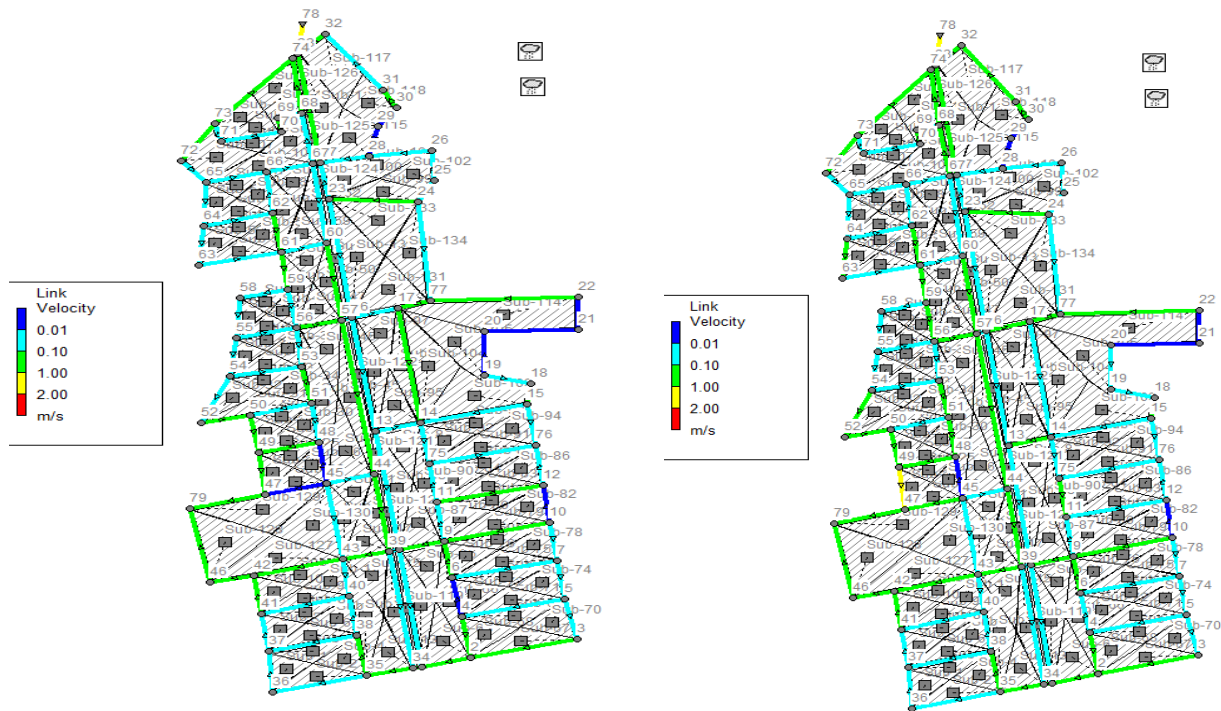


Figura 27
Mapa de velocidad para TR50 y TR100 transcurridos 30 min



Las siguientes figuras muestran los mapas de inundación para diferentes periodos de retorno.

Las figuras 28 y 29 representan los periodos de retorno de 3, 5 y 10 años, respectivamente. En estas figuras, se observa un patrón de comportamiento similar, con una leve diferencia en el tramo de la Avenida 11A Este, Calle 11 Norte y Avenida 12 Este, donde las profundidades alcanzan entre 0.15 y 0.30 metros. Estas profundidades superan la altura del andén, que tiene una altura máxima de 0.15 metros en la zona de estudio.

En la figura 30 se muestran los periodos de retorno de 50 y 100 años. Al igual que en la figura 29, hay una gran presencia de profundidades de 0.05 a 0.10 metros. No obstante, en esta figura se observan más tramos con profundidades que oscilan entre 0.15 y 0.30 metros, especialmente en la parte inferior nororiental de la subcuenca.

Esta información es crucial para comprender la capacidad de drenaje y los posibles puntos de acumulación de flujo, los cuales podrían requerir atención para evitar problemas de inundación en la zona.

Figura 28

Mapa de inundación para TR3 transcurridos 30 min

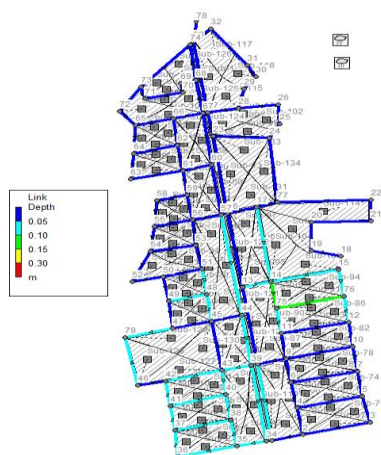


Figura 29
Mapa de inundación para TR5 y TR10 transcurridos 30 min

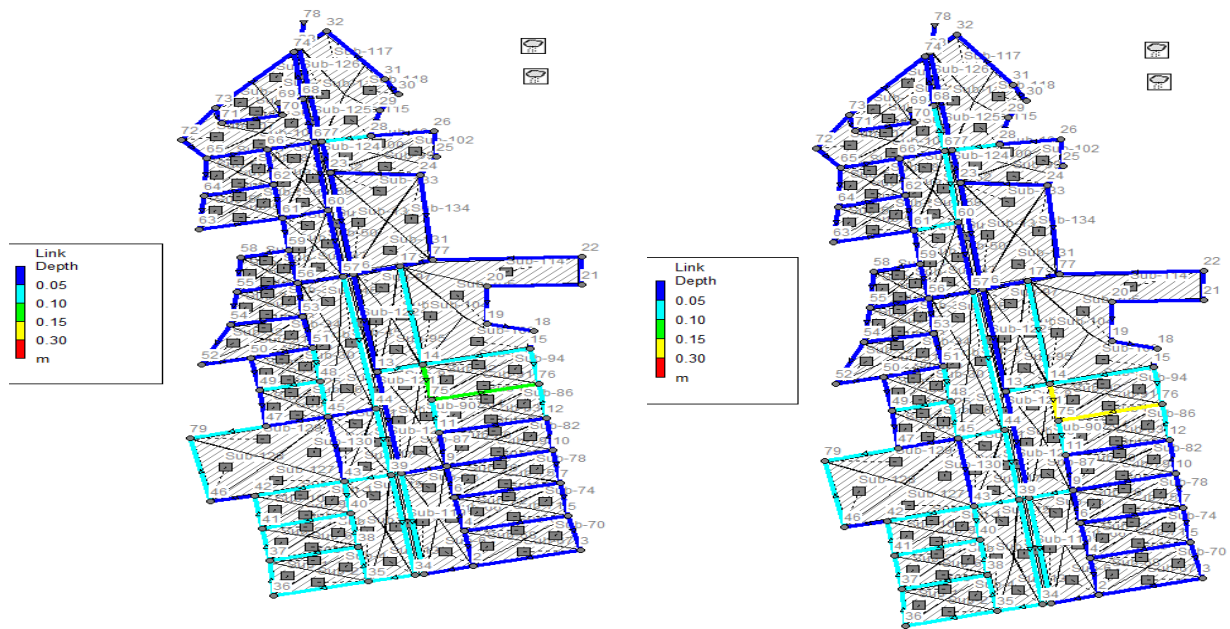
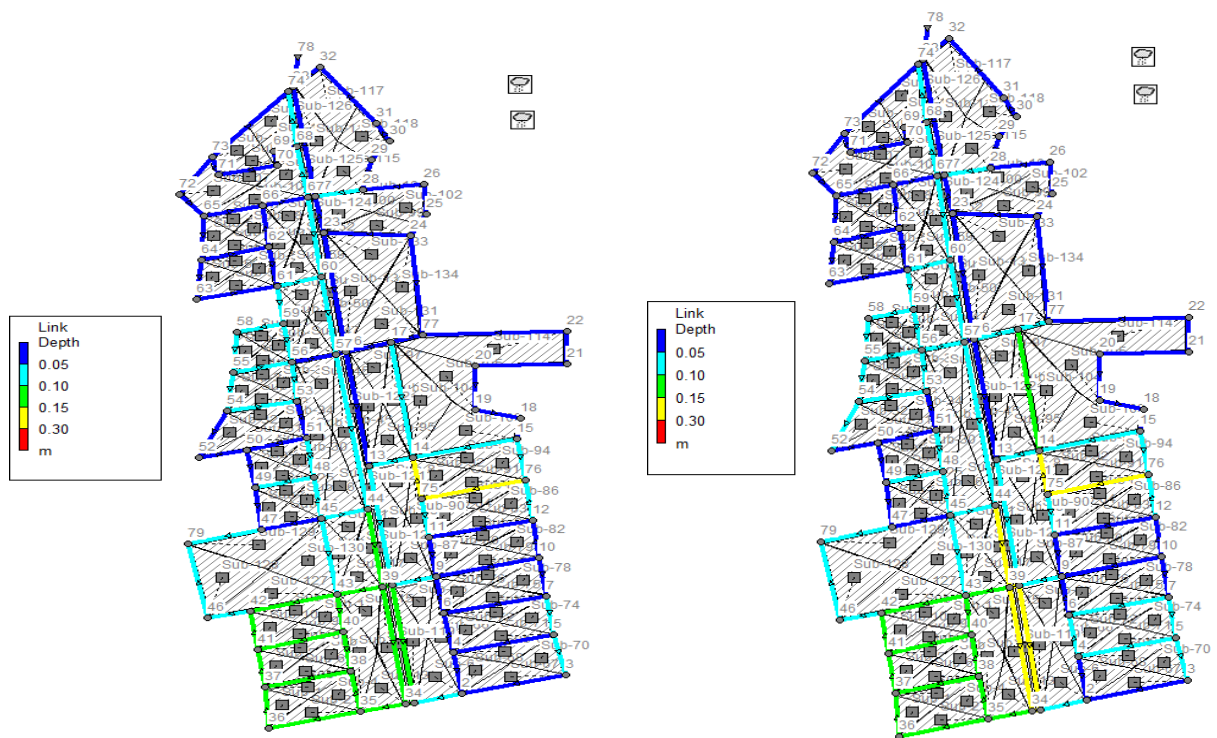


Figura 30
Mapa de inundación para TR50 y TR100 transcurridos 30 min



CONCLUSIONES

- Mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Modelos Digitales de Elevación (DEM), se determinaron parámetros geomorfológicos de la cuenca, tales como el área, longitud y pendiente media del cauce. Además, el DEM se utilizó para asignar a cada nodo las características correspondientes, las cuales se integraron como parte de la elaboración del modelo en el software SWMM.
- Durante el proceso de descarga y recopilación de datos de precipitación obtenidos del IDEAM, se evidenció una carencia total de datos en los años 2016-2018 los cuales no fueron tomados en consideración para su análisis. Además, se identificó una ausencia parcial de datos para los años 2019-2022. Para abordar esta falta de datos, se implementó el método de datos faltantes con el fin de obtener una serie completa y consistente para los análisis hidrometeorológicos.
- Según el análisis hidrológico realizado y basándonos en el numeral 4.4.3.4 Tiempo de concentración (RAS), se determinó que este es de 28 minutos. Esta estimación se debe a la pendiente media muy baja del terreno, lo que resulta en una velocidad de flujo mínima. Además, la longitud del recorrido es considerable, lo que contribuye a un mayor tiempo de recorrido.
- La modelación hidrodinámica de una red de drenaje es una herramienta valiosa que facilita la toma de decisiones en empresas de acueducto y alcantarillado. Esta herramienta permite entender mejor los procesos que ocurren en la red, proporcionando una representación realista y detallada de su funcionamiento.
- Las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) sintetizan el comportamiento pluvial de una zona y su determinación es crucial. Mediante un análisis adecuado de estas curvas, se

puede obtener el volumen máximo de agua que debe ser evacuado en un determinado lapso de tiempo. A partir de este análisis se obtiene el caudal de diseño, que a su vez determina el tamaño de la obra hidráulica necesaria para manejar dicho caudal.

- Como se puede apreciar en la gráfica 17, existen distinciones entre los datos reales y los simulados. En general, los datos simulados tienden a mostrar fluctuaciones más pronunciadas y rápidas. Además, hay momentos en los que los datos simulados no coinciden exactamente con la magnitud y el momento de los picos de los datos reales. Sin embargo, esto podría mejorar con la incorporación de más datos observados.
- Para la corroboración de la calibración del modelo se evaluó con el coeficiente de eficiencia NSE, arrojando un valor cercano a 1 lo que indica que se ha logrado ajustar los parámetros del modelo de manera que la simulación coindice muy de cerca con los datos reales, dando así confiabilidad en las simulaciones y predicciones hidrodinámicas futuras realizadas por el modelo.
- El modelo hidrológico e hidráulico (1D) construido en esta investigación contribuye en gran parte a disminuir la brecha que presentan las ciudades de países en vía de desarrollo como Cúcuta, ya que no cuentan con herramientas computacionales que permiten la modelación de los sistemas de drenaje existentes para conocer la respuesta de estos ante diferentes eventos de precipitación. Ayudando a los tomadores de decisiones a comprender la vulnerabilidad de la ciudad a cambios en el clima, con el fin de buscar alternativas de prevención y mitigación, permitiendo que Cúcuta sea más resiliente ante impactos futuros.

RECOMENDACIONES

Aunque un NSE de 0.9998 sugiere una calibración excelente, siempre es beneficioso explorar y utilizar otros métodos de calibración para asegurar la robustez y fiabilidad del modelo hidrodinámico. Aquí algunas recomendaciones de métodos adicionales que podrían mejorar aún más la calibración del modelo:

CALIBRACIÓN MULTI-OBJETIVO: En lugar de usar solo una métrica (como NSE), este método utiliza múltiples objetivos para la calibración, como el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación (R^2), el índice de concordancia de Willmott, entre otros; proporcionando una visión más completa del rendimiento del modelo y asegura que el modelo funcione bien bajo diversas métricas y condiciones.

OPTIMIZACIÓN EVOLUTIVA: Métodos como los algoritmos genéticos (GA), optimización por enjambre de partículas (PSO) o algoritmos evolutivos multiobjetivo (MOEA) que buscan optimizar los parámetros del modelo mediante técnicas inspiradas en la evolución natural. Estos métodos pueden encontrar soluciones globales en grandes espacios de búsqueda y son útiles cuando hay múltiples parámetros a calibrar.

De manera más específica se tiene que

- **Combinar Métodos:** Considerar la combinación de múltiples métodos, como la calibración multi-objetivo junto con la optimización evolutiva, para obtener una calibración más robusta y confiable.

- **Evaluar Regularmente:** Incluso con un NSE alto, es importante realizar evaluaciones regulares del modelo con nuevos datos observacionales para asegurar que el modelo mantenga su precisión a lo largo del tiempo y en diferentes condiciones.
- **Capacitación Continua:** Capacitarse continuamente en nuevas metodologías y herramientas de calibración puede aportar innovaciones y mejoras en la precisión y eficiencia del modelo hidrodinámico.

Implementar estos métodos adicionales y combinaciones puede proporcionar una comprensión más profunda del comportamiento del modelo, garantizar su robustez y aumentar la confiabilidad de las predicciones.

REFERENCIAS

AMENAZAS INUNDACIÓN - IDEAM. (n.d.). Gov.co. Retrieved October 20, 2023, from <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>

ANÁLISIS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA MITIGACIÓN DE RIESGO POR REBOSAMIENTO DEL ALCANTARILLADO EN EL BARRIO SANTA CECILIA DE LA LOCALIDAD DE SUBA. (s/f). Edu.co. Recuperado el 26 de octubre de 2023, de <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/10917/Trabajo%20de%20Grado.pdf?sequence=1>

Cabrera, J.W. (2012). MODELOS HIDROLÓGICOS. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

Canal Bogotá de Cúcuta, cuenta con 320 metros más de prolongación – Corponor. (s/f). Gov.co. Recuperado el 10 de enero de 2024, de <https://corponor.gov.co/web/index.php/2017/12/07/canal-bogota-de-cucuta-cuenta-con-320-metros-mas-de-prolongacion/>

Departamento Nacional de Planeación. (agosto de 2005). Ministerio de Ambiente. Recuperado el 15 de 01 de 2024, de Guía Ambiental para evitar, corregir y compensar los impactos de las acciones de reducción y prevención de riesgos en el nivel municipal: http://www.minambiente.gov.co/documentos/42_guia_reduccion_y_preencion_de_riesgos.pdf

Dey, A. K., & Kamioka, S. (Feb, 2007). An integrated modeling approach to predict flooding on urban basin. *Water Science and Technology*, 55(4), 19-29. DOI: 10.2166/wst.2007.091

Estudio de la vulnerabilidad de una red de drenaje mediante el método de Monte Carlo. (s/f).

Upc.edu. Recuperado el 26 de octubre de 2023, de

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4380/06.pdf?sequence=37&isAllowed=y>

Gobernación de Norte de Santander, Sistema Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres, & Unidad Nacional para la Gestión de Riesgos de Desastres. (s/f). *PDGRD Norte de Santander*. SlideShare. Recuperado el 12 de enero de 2024, de <https://es.slideshare.net/cjulianb/pdgrd-norte-de-santander>

Guarniz Muñoz, C. K. (2014). *Comparación de los modelos Hidráulicos Unidimensional (HEC-RAS) y Bidimensional (IBER) en el Análisis de Rotura en Presas de Materiales Suelos; y Aplicación a la Presa Palo Redondo (Tesis de Pregrado).* Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú. Retrieved from http://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/upaorep/634/1/GUARNIZ_CARLOS_COMPARACION%20DE%20MODELOS_HIDRAULICOS.pdf

IDIGER. (n.d.). Gov.co. Retrieved October 20, 2023, from <https://www.idiger.gov.co/rinundacion>

Jorquera, E., Weber, J. F., & Reyna, S. M. (2012). *Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada.* Retrieved from http://www.ina.gob.ar/pdf/ifrrhh/03_014_Jorquera.pdf

Juan M Stella, E. N. A. (2018, mayo 3). *Modelación del impacto de inundaciones en una cuenca subtropical en el sur de Florida*. 16.

Kolsoumi, S. (s/f). *Nash Sutcliffe model efficiency coefficient calculator*. Agrimetsoft.com.

Recuperado el 18 de junio de 2024, de

<https://agrimetsoft.com/calculators/Nash%20Sutcliffe%20model%20Efficiency%20coefficient>

Lewis A. Rossman Environmental Scientist, Emeritus U.S. Environmental Protection Agency.

(2015). *SWMM Modelo de Gestion de Aguas Pluviales 5.1 Manual de usuario*.

[https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-](https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-02/documents/epaswmm5_1_manual_master_8-2-15.pdf)

[02/documents/epaswmm5_1_manual_master_8-2-15.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-02/documents/epaswmm5_1_manual_master_8-2-15.pdf)

Li, J., You, X., Ji, M., Pan, L. and Wang, X. (2011). *The Study of Overflow Reduction Strategies in Urban Drainage System*. Energy Procedia.11, 3620/3628.

Lineamientos para el diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS. (n.d.). Gov.co.

Retrieved October 22, 2023, from

https://proyectostipo.dnp.gov.co/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=250&Itemid=321

Ministerio de transporte, Instituto Nacional de Vias. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*.

INVIAS Gov.co. [https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-](https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras)

[documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras](https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras)

Ministerio de Vivienda, C. y. T. (2017, junio 8). *Resolución 0330 de 2017*. Gov.co.
<https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf>

Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling, SS 2011*. Zürich: Institute of Environmental Engineering. ETH Zürich.

National Geographic. (2019). *Floods—facts and information*. Retrieved January 4, 2020, from
<https://www.nationalgeographic.com/environment/natural-disasters/floods/>

Ponce, G.A., Grande, S., Eder, M., Testa-Tacchino, A.J.S., Carignano, C.A., Rodriguez, A. *Application of hydrological and hydraulic models to quantify surface runoff in the endorheic system of the La Picasa Lagoon basin [Article@Aplicación de modelos hidrológicos e hidráulicos para cuantificación de escurrimientos superficiales del sistema endorreico cuenca Laguna La Picasa]* (2022) *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13 (5), pp. 136-199.

Rossman, L. A. (2010). *Storm water management model user's manual*, version 5.0 (p. 276).

Sequías, tormentas e inundaciones: el agua y el cambio climático dominan la lista de desastres. (2021, July 22). Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2021/07/1494632>

Tapiero, D. I. S. (2021). *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)*. Universidad de Pamplona.

Temez, J.R. (1978). *Calculo hidrometeorologico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección general de carreteras, España (ISBN: 84-7433-040-8).*

Universidad, F., De, P., Santander, U. F. P. S., Héctor, M., Hermógenes Suárez, J., Supervisorconvenio, G., Carrillo, G. A., Coordinador, S., Coordinador, T., Hidroclimático, C., Omaña, C. A., Cumbe, B. T., Ana, P., Díaz, G., Hidroclimático, R. C., Geaneth, I., Balcázar, V., Componente, C., De Vulnerabilidad, A., ... Rivera Vaca, Y. (s/f). *PLAN INTEGRAL DE CAMBIO CLIMÁTICO*. Gov.co. Recuperado el 21 de octubre de 2023, de https://corponor.gov.co/corponor/PICCDNS/Plan_Integral_de_Cambio_Climatico_Departamento_Norte_de_Santander.pdf

Us Epa, O. (2014). *Storm water management model (SWMM)*. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

Y. Castrillón, «Estrategias para el control de inundaciones en la zona urbana de la cuenca del río Meléndez» Trabajo de grado. Universidad del Valle Facultad de Ingeniería Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente Programa Académico de Ingeniería Sanitaria. Cali, Colombia, 2014

APÉNDICES

Apéndice A: Cálculos, Archivo Microsoft Excel

- Primera hoja: Datos completos de la estación pluviométrica Aeropuerto Camilo Daza
Esta hoja contiene todos los datos recopilados de la estación pluviométrica situada en el Aeropuerto Camilo Daza.
- Segunda hoja: Datos de la estación pluviométrica Tasajero
En esta hoja se presentan los datos obtenidos de la estación pluviométrica ubicada en Tasajero.
- Tercera hoja: Datos completos utilizados en la elaboración de curvas IDF
Esta hoja incluye todos los datos necesarios y utilizados para la elaboración de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).
- Cuarta hoja: Cálculos y gráficos correspondientes a los hietogramas
Aquí se encuentran los cálculos y los gráficos generados para los hietogramas, que representan la distribución temporal de la lluvia.
- Quinta hoja: Datos comparativos (reales y observados) del pozo 16 y datos utilizados para el cálculo del NSE
- Esta hoja presenta los datos comparativos entre los valores reales y observados del pozo 16, así como los datos utilizados para calcular el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).

Apéndice B: Profundidad de nodos, presentados en un archivo tipo archivo PDF Archivo PDF

El archivo pdf contiene cinco hojas donde se presentan los cálculos de profundidad de los nodos obtenidos del software SWMM para los diferentes periodos de retorno, respectivamente.