

**PLAN DE MEJORA AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO MEDIANTE
INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE PARA
REDUCIR EL IMPACTO DE LAS INUNDACIONES CAUSADAS POR LAS
AGUAS LLUVIAS EN EL MUNICIPIO DE CHÍA**



Presentado por:

Alfonso Sarta Fierro

Estudiante de Maestría en Gerencia de Ingeniería

Asesor de tesis

PhD. Carlos Daniel Montes Rodríguez

Maestría en Gerencia de Ingeniería, Facultad de Ingeniería

Universidad de La Sabana

Chía, Colombia

CONTENIDO

Resumen	5
Siglas y Abreviaturas	6
1. Introducción	7
2. Marco conceptual	10
2.1 Marco teórico	10
2.2 Estado del Arte	13
3. Objetivos.....	18
3.1 Objetivo general	18
3.2 Objetivos específicos.....	18
4. Descripción del problema	19
5. Metodología	24
5.1 Descripción del área de estudio	24
5.2 Modelo Hidráulico	25
5.3 Selección de estructuras LID-BMP	26
5.4 Función objetivo	30
5.5 Restricciones del modelo.....	31
5.6 Consideraciones generales	33
5.7 Formulación del plan de mejora	34
6. Desarrollo metodológico	39
7. Resultados y discusiones	42
8. Conclusiones	47
9. Recomendaciones y trabajos futuros.....	49
10. Referencias	50
11. Anexos	57
11.1 Algoritmo de optimización implementado en Spyder	57
11.2 Datos de flujo en todos los nodos del estado inicial de la red.....	62
11.3 Datos de flujo en todos los nodos después de utilizar SuDS	62

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Sistema de drenaje urbano de Chía	11
Ilustración 2. Lluvia característica de la Sabana de Bogotá considerando escenarios de cambio climático con un periodo de retorno de 10 años	13
Ilustración 3. Zonas propensas a inundación de Chía para el año 2023	20
Ilustración 4. Red pluvial del área de estudio	22
Ilustración 5. Desbordamientos en los nodos de la red inicial con el hietograma de diseño para un periodo de retorno de 10 años	23
Ilustración 6. Tipos de estructura LID a usar	27
Ilustración 7. Diagrama de flujo del paso a paso del algoritmo Simulated Annealing para optimizar la red	29
Ilustración 8. Nomenclatura de subcuencas de la red	31
Ilustración 9. Restricciones en áreas para cada tipo de estructura LID	33
Ilustración 10. Plan de mejora para el sistema de alcantarillado pluvial de Chía...35	
Ilustración 11. Estratificación social de la zona de estudio según el último censo (2018) del DANE	37
Ilustración 12. Costos de inundaciones (€/m ²) para diferentes estratos sociales y usos de suelo.....	37
Ilustración 13. Modelo inicial en SWMM: Total de inundación en LPS (Litros por segundo) de cada nodo	39
Ilustración 14. Gráfica de inundación vs tiempo en el nodo 21 de la red	41
Ilustración 15. Estado final de la red (Valores en LPS).....	42
Ilustración 16. Función de solidos suspendidos antes y después de la implementación de las estructuras LID.	45
Ilustración 17. Función objetivo (LPS por minuto de lluvia) vs iteraciones.....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Siglas y Abreviaturas	6
Tabla 2. Parámetros claves de las estructuras LID en el modelo SWMM	27
Tabla 3. Costos asociados a las estructuras LID a utilizar.....	30
Tabla 4. Restricciones de áreas para cada tipo de estructura LID en todas las subcuencas de la red.....	32
Tabla 5. Resultados iniciales de los nodos inundados en la red.....	40
Tabla 6. Cantidad de Estructuras LID para cada subcuenca	43
Tabla 7. Resultados iniciales de los nodos inundados en la red.....	44

RESUMEN

El municipio de Chía, al igual que muchos otros de la región de Sabana Centro, enfrenta problemas de inundaciones en ciertas zonas urbanas que afectan el funcionamiento global de su red de alcantarillado pluvial y sanitario. El desarrollo urbano de Chía en los últimos años ha reducido considerablemente la permeabilidad del suelo, lo que aumenta los caudales de escorrentía y ocasiona eventos de inundación y desbordamiento de aguas pluviales y residuales en lugares específicos del municipio, generando efectos negativos en el medio ambiente, la calidad de vida y, en ocasiones, problemas de salud pública.

Por esta razón, esta tesis de grado tiene como objetivo proponer un plan de mejora al sistema de alcantarillado mediante la integración de sistemas de drenaje urbano sostenible (SuDS por sus siglas en inglés) con el sistema actual de alcantarillado, con el fin de reducir las inundaciones producidas por las aguas lluvias en el municipio de Chía. Para esto, se emplearán simulaciones en el modelo SWMM (Storm Water Management Model) junto con modelos de optimización, como el Simulated Annealing (SA), que minimicen el volumen de inundación general de la red utilizando cada estructura tipo de SuDS. La finalidad es obtener un plan coherente con la capacidad económica que tiene la ciudad en términos de inversión. Se espera lograr una reducción del 40% en el volumen de escorrentía sobre la superficie estudiada, lo que contribuirá significativamente a mejorar la resiliencia urbana frente a las inundaciones y sus impactos negativos.

SIGLAS Y ABREVIATURAS

Tabla 1. Siglas y Abreviaturas

Abreviaturas/ Siglas	Descripción
BC	Bioretention Cells (Celdas de bioretención)
BMP's	Best Management Practice (Mejores prácticas de gestión)
CMS	Metros Cúbicos por Segundo
GF	Green Roof (Techos verdes)
GI	Green Infrastructure (Infraestructura verde)
IDF	Intensidad/Duración-Frecuencia
LID	Low Impact Development (Desarrollo de Bajo Impacto)
LPS	Litros por Segundo
N	Periodo de Retorno
CN	Curve Number (Número de Curva)
PP	Permeable Pavement (Pavimento permeable o poroso)
RV	Runoff Volume (Volumen de escorrentía)
SST	Sólidos suspendidos totales
SuDS	Sistema urbano de drenaje sostenible
SWMM	Storm Water Management Model (Modelo de gestión de aguas lluvias)

Fuente: Elaboración propia

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones urbanas constituyen una problemática de relevancia global que afecta negativamente la calidad de vida de las comunidades y presenta desafíos significativos para el desarrollo sostenible de una ciudad. En este contexto, comprender a fondo y abordar esta problemática a nivel urbano es crucial para garantizar la seguridad, la salud y el bienestar de los ciudadanos, así como para preservar los recursos urbanos y fomentar la resiliencia ante eventos climáticos extremos (Ju et al., 2023; Sahana et al., 2018). Dentro de las estrategias para mitigar las inundaciones urbanas, las estructuras de Drenaje Urbano Sostenible (SuDS) surgen como enfoques eficaces y sostenibles que buscan replicar procesos naturales para gestionar el agua lluvia de manera más eficiente en entornos urbanos. Estas técnicas incluyen desde soluciones basadas en la vegetación, como techos verdes y pavimentos permeables, hasta dispositivos de almacenamiento y filtración de agua, como bio-retenciones y otros sistemas de captación de aguas pluviales (Uribe et al., 2022).

La ciudad de Chía, ubicada en el departamento de Cundinamarca, Colombia, enfrenta actualmente grandes desafíos en términos de inundaciones urbanas según el comunicado de Departamento Nacional de Planeación en 2017. El rápido crecimiento urbano y los cambios en el uso del suelo han llevado a una creciente impermeabilización de todo el casco urbano. El DANE según los censos realizados en los años 2005 y 2018 prevé que la ciudad de Chía tendrá un crecimiento medio anual en los próximos 11 años del 2%, alcanzando una población aproximada de 206.626 habitantes versus los 131.181 reportados en el año 2018 (Alcaldía Municipal de Chía, 2020a). El incremento poblacional trae consigo desarrollo urbanístico, que obliga a impermeabilizar áreas que naturalmente son permeables. Esto genera incrementos en los caudales de escorrentía, puesto que el agua lluvia no se podrá infiltrar con la misma tasa que lo hacía antes originalmente.

En la literatura científica, diversos estudios han abordado la problemática de las inundaciones urbanas desde el punto de vista de la modelación matemática. Investigaciones previas como las realizadas por Gong et al., (2019) han explorado estrategias para reducir la escorrentía y controlar las inundaciones mediante el análisis de diferentes parámetros hidrológicos tales como el área permeable y el CN de la zona de estudio. Otros estudios como el realizado por Wang et al., (2023) destacan la idea de utilizar capas de vegetación sobre la capa permeable de la ciudad como una forma sostenible de retener la infiltración del agua en caudales picos a las redes de alcantarillado de las ciudades denominadas estructuras LID. Una técnica particularmente destacada en la optimización y ubicación de las estructuras LID es el Simulated Annealing (SA), un algoritmo de optimización inspirado en procesos metalúrgicos que ha demostrado su eficacia en la resolución de problemas de diseño en ingeniería hidráulica y de drenaje urbano (Cunha et al., 2016). Otros estudios como el realizado por Huang et al., (2018) afirman que, el algoritmo metaheurístico SA puede ser utilizado con el propósito de abordar modelos de optimización, ya que dicho algoritmo es el más adecuado para situaciones que involucran múltiples variables y tiene más espacio para soluciones factibles en comparación con otros enfoques, y está menos restringido por parámetros de cálculo y es más sencillo de utilizar. Otros Modelos de optimización han utilizado este algoritmo en el diseño óptimo del tamaño y la pendiente del conducto en un sistema de alcantarillado (Karovic & Mays, 2014) y en el diseño óptimo de sistemas de cuencas de detención a escala de cuenca, sin considerar el comportamiento del sistema de alcantarillado (Oxley & Mays, 2014).

En este contexto, este trabajo propone una alternativa a la problemática de las inundaciones urbanas en Chía, utilizando la localización óptima de estructuras tipo SuDS en una sub-cuenca urbana de este municipio. A lo largo de este trabajo, se revisarán las técnicas SuDS aplicables, se describirá en detalle la problemática actual de inundaciones en Chía y calidad del agua drenada al río Frío, se realizará una revisión de la literatura que aborda la modelación matemática de este problema,

se destacará la aplicabilidad del SA y presentará un plan de mejora para que la empresa local encargada del mantenimiento y diseño de la red pluvial y sanitaria del municipio de chía (Emserchía) pueda llegar a implementar en un futuro.

Con el panorama ya presentado, y viendo la importancia de plantear alternativas de reducción de inundaciones a nivel urbano, este proyecto aborda la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo se puede mejorar de manera sostenible y económicamente viable el sistema de alcantarillado para reducir las inundaciones causadas por aguas pluviales en el municipio de Chía?

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Marco teórico

2.1.1 Volumen de escorrentía

Volumen que se genera poco después de comenzada la lluvia, debe ser captado por los sumideros y/o alcantarillas, ya que, en caso contrario, causaría inundaciones y demás impactos socioeconómicos. La evacuación de la escorrentía de aguas lluvias podría lograrse satisfactoriamente a través de las calles. La recolección de aguas lluvias necesariamente implica también la captación de material granular y coloidal que la escorrentía superficial transporta. Igualmente, pueden captarse lodos provenientes de conexiones erradas sanitarias (Minvivienda, 2015).

2.1.2 Periodo de retorno

Número de años en que en promedio la magnitud de un evento extremo es igualada o excedida (Minvivienda, 2015). Este valor dependerá del grado de importancia de la obra a analizar/diseñar. Por ejemplo, según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), para tramos de alcantarillado con áreas tributarias mayores a 10 ha se toma un periodo de retorno de 10 años. Sistemas con mayor importancia, como canales abiertos que drenen grandes áreas, tendrán periodos entre 50 y 100 años.

2.1.3 Drenaje urbano sostenible

Son prácticas de gestión de aguas lluvias que de manera natural y sostenible reducen el nivel de escorrentía en el paisaje urbano, también puede ser conocido como infraestructura verde o estructuras LID-BMP (Low impact development – Best management practices) (Y. Liu et al., 2015).

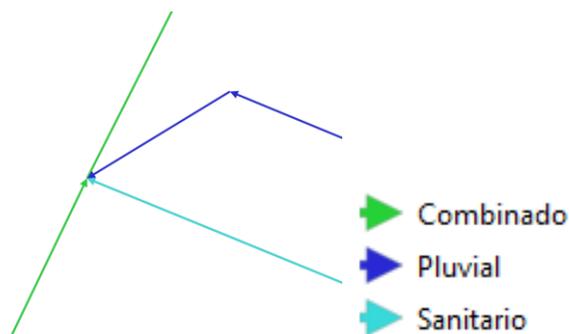
Por lo general, estos sistemas están diseñados para ser económica y ambientalmente efectivos al reducir la concentración de contaminantes en la escorrentía urbana, además de ser beneficiosos para minimizar riesgos por inundaciones al retrasar el volumen y caudal máximo de escorrentía de aguas lluvias (Ghodsí et al., 2020).

2.1.4 Sistema de alcantarillado urbano

Los sistemas convencionales se dividen en alcantarillados separados y alcantarillados combinados. En los primeros, las aguas residuales y las aguas lluvias son recolectadas y evacuadas por sistemas totalmente independientes; en tal caso, el sistema separado de alcantarillado de aguas residuales usualmente se denomina alcantarillado de aguas residuales; y el sistema por el cual se recolectan y se transportan las aguas lluvias se denomina alcantarillado de aguas lluvias. Los sistemas de alcantarillado combinados son aquellos en los cuales tanto las aguas residuales como las aguas lluvias son recolectadas y transportadas por el mismo sistema de tuberías (Minvivienda, 2015).

En la Ilustración 1 se observa un ejemplo de cómo la red combinada es formada a partir de una tubería de red sanitaria o residual y por otra tubería de red pluvial.

Ilustración 1. Sistema de drenaje urbano de Chía



Fuente: Elaboración propia (Qgis)

2.1.5 Estructuras LID

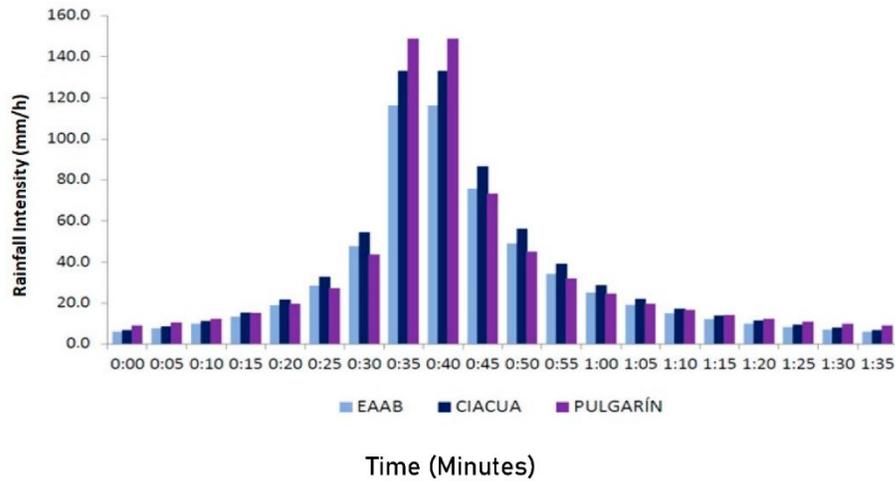
Las soluciones LID suelen diseñarse para capturar aguas pluviales en su origen con el fin de minimizar el transporte de escorrentía, lo que resulta en una reducción de la contaminación de las aguas pluviales y en el aporte de beneficios ambientales positivos. Los estudios tales como (Dietz, 2007; Liu et al., 2021; Nazari et al., 2023; Yin et al., 2020) han demostrado beneficios de estructuras de desarrollo de bajo impacto en la gestión de la escorrentía urbana. Algunas de las soluciones LID más comunes incluyen techos verdes, barriles de lluvia, celdas de bioretención, pavimentos permeables y canales con vegetación.

2.1.6 Lluvia de diseño

La tormenta de diseño se refiere a la cantidad de lluvia medida en un punto durante un evento climático extremo. Se puede describir mediante un hietograma de diseño, que es un gráfico que muestra cómo se distribuye esa lluvia a lo largo del tiempo durante la tormenta (Alcaldía Municipal de Chía, 2022).

En la Ilustración 2 se muestra un hietograma típico para la región de la sabana norte en Colombia, considerando escenarios de cambio climático. El fenómeno del cambio climático está ocasionando un incremento en la intensidad de las lluvias, lo cual, combinado con el gran crecimiento poblacional que tiene la región y la falta de desarrollo de la infraestructura hídrica, resulta en un aumento de los niveles máximos en los cuerpos de agua (Saldarriaga et al., 2020; Willems et al., 2012).

Ilustración 2. Lluvia característica de la Sabana de Bogotá considerando escenarios de cambio climático con un periodo de retorno de 10 años



Fuente: (Saldarriaga et al., 2020)

2.1.7 Subcuenca

Se definen como la superficie de terreno cuya escorrentía superficial fluye en su totalidad a través de una serie de corrientes, ríos y, eventualmente, lagos hacia un determinado punto de un curso de agua (generalmente un lago o una confluencia de ríos redes de alcantarilado) (Minvivienda, 2015).

2.2 Estado del Arte

Los sistemas de drenaje urbano sostenibles se definen como redes combinadas de vegetación urbana para gestionar localmente las aguas pluviales. En un entorno urbano, la infraestructura verde combina soluciones técnicas con principios naturales en un todo funcional (Wang & Banzhaf, 2018). Entre los diferentes sistemas de gestión de inundaciones urbanas, se ha reportado que los SuDS son una estrategia emergente efectiva para disminuir la escorrentía y los picos de inundación, lo que conduce a la planificación espacial y al logro de objetivos ambientales y de sostenibilidad (Wolch et al., 2014).

La literatura ha mostrado novedosos avances en el tema del sistema de drenaje urbano sostenible desde hace unos años hasta la actualidad. Son varias las entidades y varios los autores que buscan dar solución al vertimiento de las aguas pluviales y así mitigar el volumen de escorrentía desde un punto de vista sostenible y amigable con el medio ambiente. Uno de los casos más recientes fue presentado por Zhu et al., (2023) donde propuso la reducción de desbordamientos del alcantarillado combinado en la ciudad de Buffalo en Nueva York, utilizando cisternas de retención de agua (Infraestructura verde) de hasta 12 horas en 897 subcuencas con más de 2,000 m², obteniendo como resultado hasta el 18% de reducción de volumen de escorrentía.

A nivel local, en distintas ciudades de Colombia se ha estudiado la implementación de estructuras tipo SuDS para control de inundaciones y mejora de calidad de agua. Por ejemplo, en Cali en el año 2018 se demostró que con una inversión de 7.3 millones de dólares en la implementación de este tipo de estructuras se lograría reducciones de hasta el 83% en inundaciones (Martínez et al., 2018). Este estudio no solo considera el nivel de inundación, sino también la carga de contaminantes y la escorrentía total hacia el río Meléndez, lo que contribuye a mejorar la calidad del agua en el cauce y la calidad de vida de la población local. Estudios como el realizado por Catimay et al., (2018) demuestran que el modelo EPA-SWMM 5.1 cumple satisfactoriamente los requerimientos para modelar techos verdes y otros tipos de controles LID como celdas de bioretención y pavimentos porosos en Colombia dado que es un software libre, cuenta con un módulo de SuDS, permite modelar eventos de lluvia continuos, entre otras variables. Otro ejemplo de control de escorrentía urbana en Colombia se da en el estudio realizado por Cubides et al., (2018) donde muestran que el uso de nuevas alternativas de drenaje urbano como complemento de los sistemas de drenajes existentes, permite mejorar de manera significativa la eficiencia de desagües de aguas lluvias en una ciudad, además de obtener beneficios como: Aminorar los caudales pico disminuyendo el riesgo de que se presenten fenómenos de inundación, mejorar la calidad del agua procedente de

las escorrentías, eliminando los contaminantes procedentes de fuentes difusas, mejorar el paisaje urbano y ofrecer un mejor servicio al ciudadano.

En Colombia, se observa un creciente interés en la implementación de SuDS como una adición a los sistemas de drenaje tradicionales. Esto se debe a la creciente comprensión de la necesidad de adoptar nuevas estrategias para reducir el flujo de escorrentía en las redes de aguas pluviales planificadas, al mismo tiempo que se busca que estas alternativas sean respetuosas con el medio ambiente y minimicen su impacto negativo (Cubides et al., 2018).

Los SuDS utilizados para reducir la producción de escorrentía urbana deben ser ubicados y dimensionados de manera adecuada para aumentar su eficiencia. Dado que las inversiones de implementación de este tipo de drenaje conllevan costos significativos, es importante encontrar un equilibrio adecuado entre consideraciones económicas, técnicas, sociales y medioambientales. El proceso de toma de decisiones para satisfacer los requisitos de optimización de manera oportuna y precisa implica tareas extremadamente complejas. Por esta razón, cuando hay una gran cantidad de posibilidades posibles resulta impracticable evaluar individualmente cada opción; los modelos de optimización pueden facilitar este proceso (Cunha et al., 2016).

SWMM ha sido ampliamente utilizado para analizar y simular sistemas urbanos de aguas pluviales. Kong et al., (2017) lo emplearon para estudiar cómo responde una cuenca urbana ante cambios en el uso del suelo. Por otro lado, Roozbahani et al., (2020) lo aplicaron para simular el sistema de aguas pluviales de una región en Teherán, evaluando su desempeño en términos de confiabilidad, resiliencia, vulnerabilidad y sostenibilidad. Platz et al., (2020) evaluaron el SWMM comparando datos observados con resultados de modelado, utilizando una calibración que consideró múltiples objetivos en varios eventos. Además, Zhang et al., (2022)

emplearon el método de Monte Carlo para abordar la incertidumbre asociada con el rendimiento del SWMM en el modelado de instalaciones tipo LID.

En la mayor parte de los casos, los autores recomiendan modelar el impacto de la infraestructura verde mediante el software SWMM. Este modelo, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), es una herramienta dinámica ampliamente reconocida para la simulación hidráulica e hidrológica. Debido a su capacidad para simular sistemas de drenaje de aguas pluviales y residuales, se ha seleccionado como motor hidráulico para este proyecto. Sin embargo, en el contexto de la optimización, se necesitaba una interacción eficiente entre un optimizador y el software especializado, es decir, SWMM, para llevar a cabo múltiples ejecuciones de los modelos en un tiempo reducido. Dado el alcance de este proyecto de grado, se identificó claramente la necesidad de un vínculo entre las técnicas de optimización y el software hidráulico, lo que llevó al desarrollo del conjunto de herramientas SWMM, un enfoque similar se ha utilizado ampliamente en la optimización de los escorrentía e inundaciones, tales como Optimization Software Toolkit for Research Involving Computational Heuristics (OSTRICH) (Ghodsi et al., 2023), o el Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) (Taghizadeh et al., 2021) y el que se utilizará en este proyecto de grado SA (Simulated Annealing) propuesto por (Cunha et al., 2016) para la ubicación de unidades de almacenamiento para ayudar a mitigar inundaciones en un sistema de drenaje de alcantarillado real en una zona urbana de Portugal.

Los tipos de infraestructura verde que pueden ser aplicados a nivel ciudad y funcionan con un bajo costo pueden ser las celdas de bioretención, jardineras de calles, trincheras de infiltración, pavimento permeable y jardines de lluvia. Este tipo de obras han sido aplicados con éxito en distintas partes del mundo, como en el área metropolitana de San José, Costa Rica, logrando reducciones de hasta el 17% en el volumen de escorrentía (Uribe et al., 2022). De igual manera se suma el caso en Shenyang, una ciudad industrial en China, donde se indica cómo las capas de

suelo verdes (Infraestructura verde) ofrecen una mayor capacidad de almacenamiento de escorrentía para satisfacer la demanda de almacenamiento de escorrentía en los periodos de lluvia estudiados para la zona (Li et al., 2021).

Un número cada vez mayor de estudios confirma que la capacidad de almacenamiento de escorrentía de las infraestructuras verdes es el factor clave para mitigar las inundaciones urbanas, porque se pueden utilizar para adaptar los servicios de regulación de agua en paisajes urbanos que actualmente no cuentan con el servicio adecuado de los sistemas de drenaje existentes (Li et al., 2021; Endreny et al., 2017; Catalano de Sousa et al., 2016; Rangarajan et al., 2015).

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Proponer un plan de mejora al sistema de alcantarillado mediante la integración de sistemas de drenaje urbano sostenibles que reduzcan las inundaciones de las aguas lluvias en un área inundable del municipio de Chía.

3.2 Objetivos específicos

- 3.2.1 Identificar combinaciones de sistemas de drenaje urbano sostenible (SuDS) que mejor se adapten a la zona de estudio.
- 3.2.2 Modelar el sistema de alcantarillado pluvial actual y generar simulaciones agregando parámetros de drenaje urbano sostenible en SWMM.
- 3.2.3 Plantear un plan de mejora del sistema de alcantarillado actual de Chía basado en la optimización resultante del modelo SWMM

4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

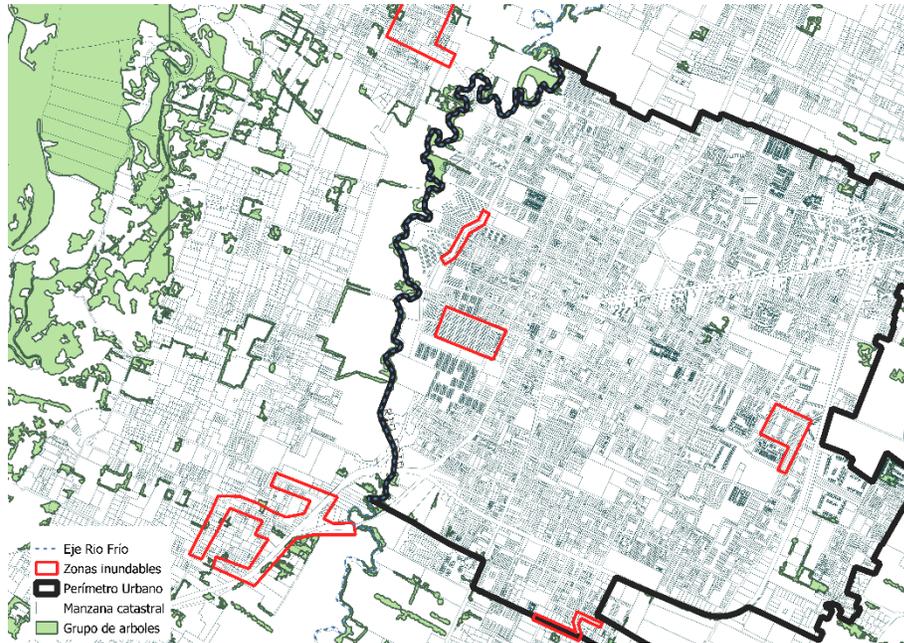
Los sistemas de drenaje existentes, originalmente concebidos bajo condiciones climáticas y urbanas más predecibles, enfrentan ahora desafíos sin precedentes debido al rápido proceso de urbanización y aumento en la impermeabilidad del suelo. Esto ha llevado a una situación en la que los sistemas de drenaje están operando más allá de su capacidad prevista, resultando en un aumento significativo de inundaciones urbanas en la ciudad de Chía.

Con el pasar de los años la superficie urbana del municipio de Chía se ha vuelto cada vez más impermeable, debido a los cambios en los usos del suelo y al desarrollo de proyectos de uso residencial, comercial e industrial. Este fenómeno, que puede definirse como “urbanización” altera el ciclo hidrológico natural, puesto que reemplaza áreas con vegetación por superficies impermeables, como carreteras, techos de edificios, estacionamientos, entre otros. Este tipo de coberturas no naturales llevan a un aumento en la escorrentía de aguas pluviales y consecuentemente a la carga de contaminantes (Shuster et al., 2005). Además, los análisis de campo y el estudio de imágenes satelitales del municipio revelan que el área verde dentro del área urbana de Chía abarca aproximadamente 0.14 km², representando apenas el 2.00% del área total. Este porcentaje resulta insuficiente para absorber el caudal de escorrentía que no puede ser canalizado por el sistema de alcantarillado pluvial o combinado mediante pozos o sumideros, caso similar al descrito por Ghodsi et al., (2023).

Emserchía E.S.P, la Empresa de Servicios Públicos de Chía, reconoce los desafíos asociados con el desbordamiento de aguas lluvias y propone proyectos a mediano y largo plazo como soluciones. Entre estas propuestas se incluye la instalación de colectores de 14" a 16" en la carrera 4 con calle 1, con el fin de conectarlos a la red pluvial de la calle 8 en el sur del municipio. Asimismo, se plantea la ampliación del colector a 40" en la Avenida Chilacos para mitigar los riesgos de inundación en estas

áreas (Emserchía E.S.P, 2019). En la Ilustración 3 se muestra desde la base de datos de Emserchía las zonas propensas a inundaciones según últimas revisiones realizadas hasta el 2023.

Ilustración 3. Zonas propensas a inundación de Chía para el año 2023



Fuente: Emserchía 2023 (Elaboración propia)

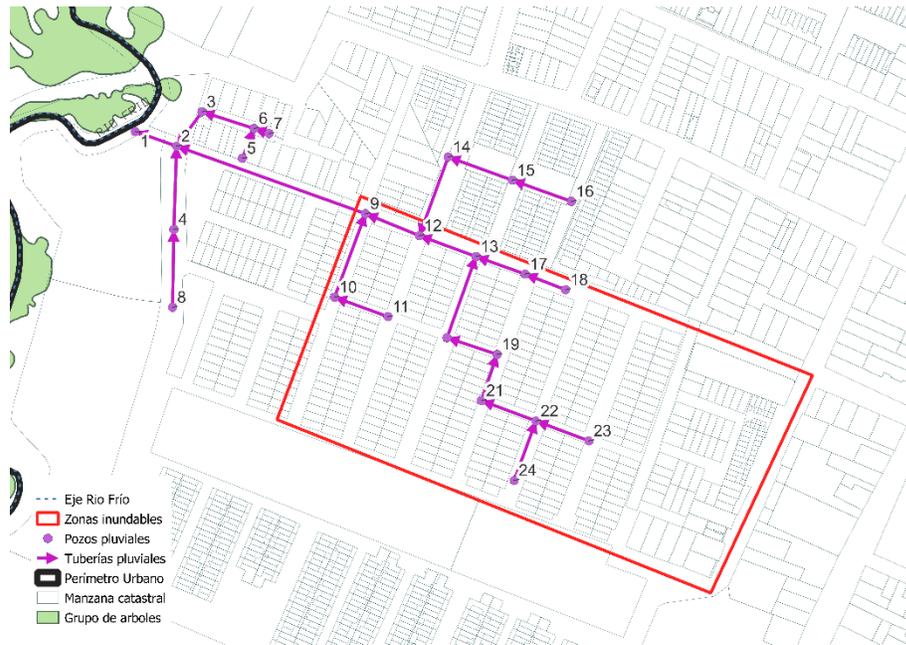
Además, en el año 2017, el Departamento Nacional de Planeación (DPN) llevó a cabo un proyecto de construcción de colectores de aguas lluvias sobre la calle 29 como parte de los esfuerzos a nivel nacional para mejorar el municipio. Esto se debe a que el sistema de alcantarillado pluvial y combinado no tiene la capacidad suficiente para drenar adecuadamente las aguas de escorrentía durante períodos de lluvias intensas (DPN, 2017). Esta situación ha generado malestar en las comunidades, afectando la calidad de vida de las personas que se ven impedidas de transitar normalmente por las vías debido al estancamiento del agua. Además, se han observado impactos negativos en la salud y el bienestar de los ciudadanos, como el aumento de enfermedades virales y respiratorias, como se menciona en un informe de la Alcaldía Municipal de Chía, (2020b).

Este proyecto se concibe como una alternativa municipal para mitigar parcialmente los daños ocasionados por el desbordamiento de aguas pluviales, empleando sistemas de drenaje urbano sostenible en el casco urbano de Chía, con costos de instalación y mantenimiento reducidos. Se establece un objetivo mínimo de reducción del 15% en el volumen de escorrentía, fundamentado en dos consideraciones principales. En primer lugar, es crucial asegurar que la intervención en las áreas urbanas del municipio sea viable tanto en términos civiles como económicos. En segundo lugar, respaldado por estudios como el realizado por Gong et al., (2019), que muestra una reducción de la escorrentía de entre el 12.1% y el 100% mediante el uso de estratos de suelos verdes, otro estudio de Wang et al., (2023), que muestra reducciones de hasta el 40% al emplear infraestructura verde integrada. La literatura respalda que el objetivo del 15% se encuentra dentro del rango de posibilidades. Este porcentaje de reducción se aplicará a los eventos de lluvia más críticos para la zona, según los estudios hidrológicos disponibles de Emserchía E.S.P.

Una vez establecida la reducción mínima esperada, se selecciona el área de estudio que se muestra en la Ilustración 4. Esta área es la más extensa dentro del núcleo urbano del municipio de Chía y será donde los SuDS tendrán el mayor impacto. Además de su tamaño, es importante intervenir este polígono debido a sus características geográficas. El sistema de alcantarillado principal atraviesa el área de estudio de manera transversal, con un caudal significativo (según los análisis del 2023 realizados por Emserchía, en época de lluvias las tuberías operan a entre el 80% y el 100% de su capacidad). También, la proximidad de este polígono a la única Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en funcionamiento en Chía es otro motivo para intervenirlo, ya que recibe tanto aguas residuales como parte de las aguas pluviales de toda la ciudad. El municipio de Chía se percibe como uno de los más extensos de la Sabana norte de Bogotá y una de las ciudades más atractivas para nuevos habitantes, debido a su ubicación geográfica, crecimiento

económico y desarrollo social, lo que eventualmente origina el crecimiento poblacional y saturación en las redes de alcantarillado.

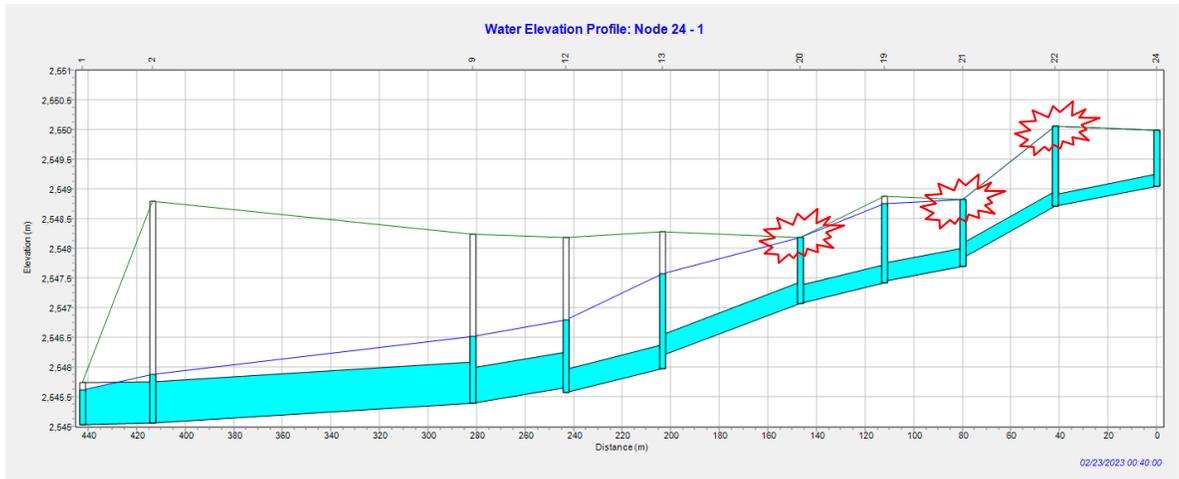
Ilustración 4. Red pluvial del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 5 ejemplifica los problemas de funcionamiento de la red pluvial actual durante eventos de lluvia con un periodo de retorno de 10 años, lo que genera desbordamientos de aguas lluvias en los nodos mostrados en la Ilustración 4 y, por ende, disconformidad en la comunidad.

Ilustración 5. Desbordamientos en los nodos de la red inicial con el hietograma de diseño para un periodo de retorno de 10 años



Fuente: Elaboración propia en el software SWMM

Desde una perspectiva analítica, el problema radica en los nodos donde el gradiente hidráulico excede la altura de los pozos, lo que conduce a desbordamientos de aguas pluviales y residuales que eventualmente resultan en inundaciones. El testimonio de Emserchía y los cálculos teóricos proporcionan una representación precisa de esta problemática de inundación en una zona específica de Chía.

5. METODOLOGÍA

Se utilizará la metodología empleada para reducir analíticamente el volumen de inundación y sedimentos suspendidos vistos en la literatura (Novotný et al., 2023; M. Wang et al., 2023; Fu et al., 2023; Aparicio Uribe et al., 2022; Oliveira et al., 2022; Li et al., 2021; Taghizadeh et al., 2021; Catalano de Sousa et al., 2016; Shuster et al., 2005) y así proponer del plan de acción.

5.1 Descripción del área de estudio

5.1.1 Especificaciones del área

El área de estudio consta de 22 subcuencas hidrologías que drenan la red pluvial ciudad de Chía, posee un área total de 47,126 m² y abarca usos de suelo tipo residencial mayormente y comercial en su minoría. Las subcuencas cuentan con una pendiente media del 1.38%, un porcentaje de impermeabilización del 10.04%, un número de curva promedio de 93.21 (Calculado según clasificación del Soil Conservation Service SCS) debido a su alto nivel de permeabilidad y está compuesta por: 12,37% de zonas verdes, 7,97% de andenes, 47,28% de tejados y un 32,39% de pavimento (Análisis de datos en Qgis).

5.1.2 Topografía y curvas de nivel del terreno

Con ayuda de los datos públicos de la ciudad, se obtienen las curvas de nivel de la zona de estudio o toda la ciudad con una diferencia de cotas que pueden oscilar entre 1 y 10 m. Con estos datos se obtendrán las pendientes necesarias para incluirlas en el modelo SWMM posteriormente.

5.1.3 Grado y dirección de la pendiente

En el estudio realizado por Taghizadeh et al., (2021) se considera la pendiente del suelo como un factor limitante con respecto al uso de la tierra en algunas partes de la región. Para este proyecto se considera una pendiente pronunciada si es mayor al 10%, por ende, todo suelo con pendiente menor puede ser potencialmente intervenido para la implementación de sistemas de drenaje urbano sostenible. La pendiente media de la red es de 1.38% y drenará en dirección al río Frío.

5.1.4 Red de alcantarillado

La información de la red fue brindada por la empresa municipal de acueducto y alcantarillado Emserchía en formato vectorial. La red posee 24 nodos (pozos de alcantarillas) que van desde los 0.61 m hasta los 2.17 m de profundidad, conectadas por tuberías en concreto con diámetros desde los 0.20 m para los nodos más alejados a la salida de la red (23 y 24) hasta los 0.70 m a la salida de la red con una pendiente promedio de toda la red de 1.36% dada la cota batea inicial del nodo 23 de 2549.954 m.s.n.m. y la cota batea a la salida de la red de 2545.033 m.s.n.m. Cada nodo tiene un área aferente a la que toda el agua de escorrentía le drenará, denominada subcuenca, las cuales se pueden apreciar en la Ilustración 8.

5.2 Modelo Hidráulico

El modelo SWMM es un software versátil diseñado para simular tanto aspectos cualitativos como cuantitativos de los fenómenos de aguas pluviales. Acomoda diversos escenarios, desde eventos individuales hasta simulaciones a largo plazo, tanto para modelado de agua superficial como subterránea. Además de estimar volúmenes de escorrentía, sobresale especialmente en simulaciones cualitativas, centrándose en la calidad de la escorrentía y pudiendo simular la generación y reducción de la contaminación en cuencas enteras. En este contexto, el modelo

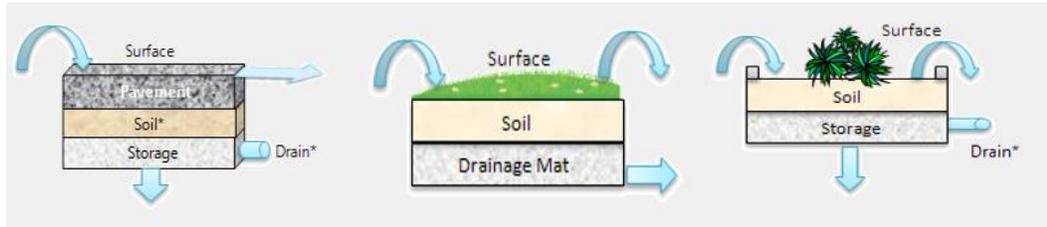
SWMM se aplicará para realizar simulaciones hidráulicas y cualitativas de la escorrentía (Taghizadeh et al., 2021).

Para modelar la red de Chía en SWMM se necesitan datos hidrológicos de las estaciones pluviométricas más cercanas al municipio, además las curvas IDF o hietograma característico de la zona con periodos de retorno de al menos 2 años como lo sugiere el estudio de (Ghodsí et al., 2023). Se escoge el hietograma característico de la zona mostrado en la Ilustración 2 como input en el software SWMM junto con las características físicas de cada tubería de la red (i.e. diámetro, pendiente y elevación, entre otros). Cabe resaltar que la mayoría de estos datos serán obtenidos de estudios previos que ya ha realizado la empresa Emserchía E.S.P. Los caudales de aguas lluvias serán calculados con el módulo hidrológico que viene incluido en el SWMM. Por esta razón se estiman números de curva y demás características de las subcuencas. Una vez modelada la red en el software se cumplirá las dos primeras actividades del objetivo específico número 2.

5.3 Selección de estructuras LID-BMP

De acuerdo con la literatura, para suelos compuestos principalmente por zonas residenciales, calles y áreas verdes, como es el caso de estudio, se obtiene que la opción más eficiente y económica son las estructuras LID, tales como los techos verdes (GR), las celdas de bioretención (BC) y los pavimentos porosos (PP) (Kong et al., 2017; S. Li et al., 2022; Y. Liu et al., 2015; Nazari et al., 2023; Yang et al., 2023; Yu et al., 2022), la estructura de cada tipo de control LID se puede apreciar en la Ilustración 6. Los parámetros de las estructuras LID seleccionadas se presentan en la Tabla 2.

Ilustración 6. Tipos de estructura LID a usar



Fuente: Elaboración propia en el software SWMM

Nota: La figura izquierda hace referencia a la estructura del pavimento poroso (PP), la figura central se refiere a los techos verdes (GR) y la figura de la derecha muestra la estructura de las celdas de bioretención (BC).

Tabla 2. Parámetros claves de las estructuras LID en el modelo SWMM

Green Roof		Bio - Retention Cell		Permeable Pavement	
Berm Height	150 mm	Berm Height	150 mm	Berm Height	150 mm
Vegetation V.F	0.8	n Manning	0.013	n Manning	0.013
n Manning	0.013	Vegetation V.F	0.8	Slope	2%
Slope	2%	Slope	2%	Thickness pavement	170 mm
Thickness Soil	700 mm	Thickness soil	700 mm	permeability	100%
Thickness Drainage	300 mm	Thickness storage	100 mm	Thickness storage	300 mm

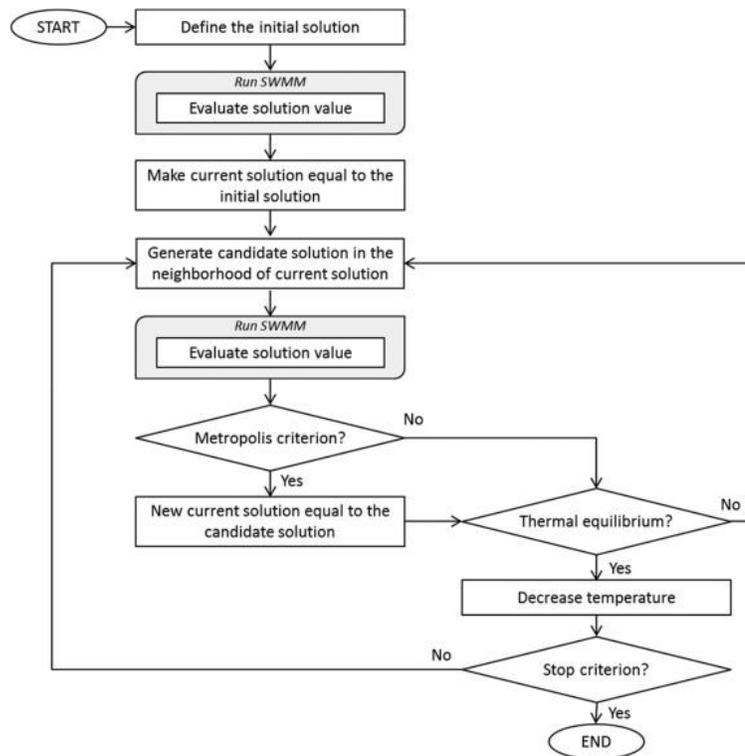
Elaboración propia

Los valores utilizados se derivan de estudios previos realizados en Colombia, como el llevado a cabo por Martínez et al., (2018). Estos valores han sido validados con empresas comerciales que fabrican este tipo de estructuras LID específicamente para la región de la Sabana Centro. El tipo y número de controles hipotéticos de LID se especificaron por unidad de área de acuerdo con el tipo de uso de la tierra y la cobertura de la superficie impermeable en cada subcuenca, los cuales serán determinadas por un algoritmo de optimización que acomodará el área a intervenir

en función del costo y reducción de volumen de escorrentía. El algoritmo que mejor se ajusta a las necesidades de la red por el número de variables a considerar es el SA. Se seleccionó este algoritmo debido a que es más adecuado para situaciones que involucran múltiples variables y ofrece más flexibilidad en la búsqueda de soluciones factibles en comparación con otros enfoques. Además, el SA tiende a estar menos restringido por parámetros de cálculo y es más fácil de implementar. Los algoritmos metaheurísticos, como el SA, son lo suficientemente rápidos y robustos como para escapar de los óptimos locales en la función de optimización, ya que tienen la capacidad de aceptar soluciones subóptimas dentro de un rango limitado. Después de aplicar el SA, un proceso de refinamiento gradual podría ayudar a obtener soluciones casi exactas (Huang et al., 2018).

En cada iteración evaluada por el algoritmo SA, se simula el comportamiento hidráulico de la red de drenaje utilizando el software SWMM. Para facilitar la conexión entre el algoritmo y el software SWMM, se utiliza el software Spyder con lenguaje de programación en Python, junto con el kit de herramientas de PySWMM (McDonnell et al., 2020). Este kit de herramientas permite acceder y modificar los datos de la red según las necesidades del algoritmo SA, tanto para generar soluciones candidatas como para definir las soluciones actuales durante la resolución del modelo. Los pasos básicos del proceso de solución se muestran en la Ilustración 7.

Ilustración 7. Diagrama de flujo del paso a paso del algoritmo Simulated Annealing para optimizar la red



Fuente: (Cunha et al., 2016)

El algoritmo buscará la combinación óptima que maximice la reducción del volumen total de inundación, minimizando al mismo tiempo los costos asociados y, por ende, las áreas que requieren intervención. Una vez completada esta parte de la metodología, se considerará que se ha cumplido totalmente el objetivo específico número 1.

Los costos de implementación de las estructuras LID comprenden un costo fijo único de inversión que comprende su instalación y un costo anual relacionado con el mantenimiento para cada tipo de estructura (El costo de mantenimiento se considerará hasta los primeros 10 años desde su instalación). Estos costos se describen en la siguiente tabla:

Tabla 3. Costos asociados a las estructuras LID a utilizar

Estructura LID	Ciclo de vida (años)	Costo total (COP/m ²)	Mantenimiento anual (COP/m ²)
Techos verdes	15-20	\$ 200,000	\$ 27,300
		(Díaz Jaramillo, 2020) <i>Nota: Ajustado según la inflación 2020-2023</i>	(Díaz Jaramillo, 2020) <i>Nota: Ajustado según la inflación 2020-2023</i>
Pavimento poroso	30-50	\$ 173,600	\$ 2,500
		(CIIA, 2017) <i>Nota: Ajustado según TMR 2023</i>	(CIIA, 2017) <i>Nota: Ajustado según TMR 2023</i>
Celda de bioretención	25	\$ 350,000	\$ 24.500,00
		(CIIA, 2017) <i>Nota: Ajustado según TMR 2023</i>	(CIIA, 2017) <i>Nota: Ajustado según TMR 2023</i>

Fuente: Elaboración propia

Nota: Las actividades de mantenimiento comprenden actividades como: inspección de zonas con estancamiento de aguas después de eventos de tormenta, aspiración de superficie, inspección de crecimiento de vegetación y su eliminación, remoción de basuras y escombros presentes en cada estructura, mantenimiento de drenaje, estabilización de áreas erosionadas, reparación y rehabilitación superficial cuando se ha perdido la capacidad de infiltración.

5.4 Función objetivo

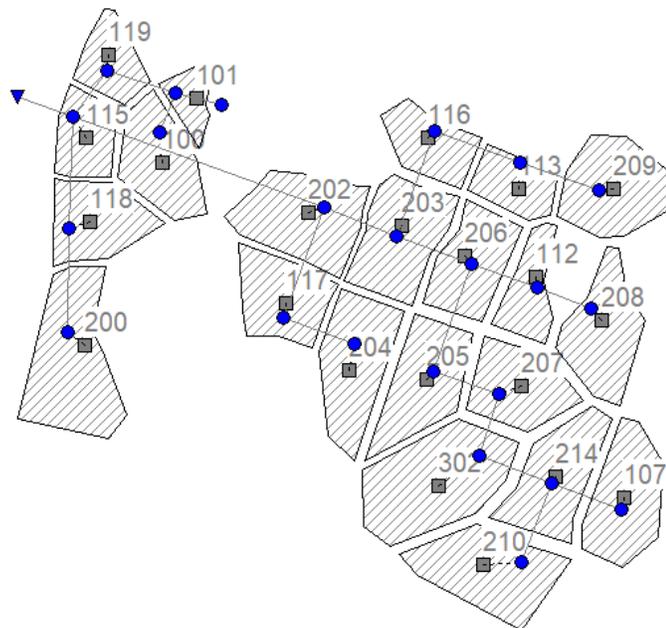
La función objetivo se diseñará para optimizar el volumen de inundación en cada subcuenca, manipulando la iteración entre los tipos de estructuras LID y la asignación de metros cuadrados a cada una de ellas. La función objetivo se expresará como la suma del volumen de inundación en litros por segundo (LPS) para cada nodo j .

$$MIN \sum_{j \in N_i} Q_j$$

5.5 Restricciones del modelo

Las restricciones del modelo se establecen mediante el costo máximo que la entidad municipal (Emserchía) puede asumir para la implementación de las estructuras LID, así como los valores máximos de cada tipo de estructura LID que puede ser asignado a cada subcuenca. Estos valores se determinan a través de un estudio de áreas realizado en un Sistema de Información Geográfica (en la Ilustración 8 se puede ver la nomenclatura de cada subcuenca), donde se delimitan previamente mediante polígonos las zonas que podrían destinarse a cada tipo de estructura LID o infraestructura verde y se presentan en la Ilustración 9 y en la Tabla 4. Restricciones de áreas para cada tipo de estructura LID en todas las subcuencas de la red.

Ilustración 8. Nomenclatura de subcuencas de la red



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Restricciones de áreas para cada tipo de estructura LID en todas las subcuencas de la red

Subcuenca	A_{\max} techos Verdes (m ²)	A_{\max} Pavimentos Permeables (m ²)	A_{\max} Celdas de Bioretención (m ²)
100	0 - 1420	0 - 450	0 - 210
101	0 - 480	0 - 190	0
107	0 - 1350	0 - 230	0 - 70
112	0 - 930	0 - 300	0 - 60
113	0 - 690	0 - 310	0 - 210
115	0 - 170	0 - 550	0 - 410
116	0 - 430	0 - 540	0 - 240
117	0 - 1310	0 - 250	0 - 110
118	0 - 470	0 - 930	0 - 250
119	0 - 370	0 - 630	0 - 300
200	0 - 300	0 - 1330	0 - 1280
202	0 - 1230	0 - 970	0 - 280
203	0 - 1140	0 - 610	0 - 120
204	0 - 1830	0 - 430	0 - 80
205	0 - 1680	0 - 400	0 - 30
206	0 - 1120	0 - 610	0 - 160
207	0 - 1680	0 - 280	0 - 50
208	0 - 1680	0 - 440	0 - 20
209	0 - 1860	0 - 240	0 - 300

210	0 - 1530	0 - 730	0 - 460
214	0 - 1900	0 - 380	0
302	0 - 2670	0 - 570	0 - 20

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 9. Restricciones en áreas para cada tipo de estructura LID



Fuente: Elaboración propia

5.6 Consideraciones generales

El modelo de SWMM se configurará con un paso de enrutamiento de 1 segundo, con el fin de garantizar una mayor precisión y así modelar adecuadamente la red proporcionada por Emserchía.

El número de iteraciones se ajustará hasta que se cumplan criterios de convergencia, especialmente en términos de temperatura (es un parámetro crucial que controla la probabilidad de aceptar soluciones peores durante la búsqueda),

entre cada solución obtenida por el algoritmo de optimización. Una vez finalizado el código, se realizará un análisis detallado de variables como inundaciones, sólidos suspendidos y áreas de estructuras LID, con el objetivo de proponer un plan de mejora para el municipio.

Todas las variables hidrológicas serán definidas directamente por el equipo de ingeniería de Emserchía hasta el año 2023. Los estudios realizados para obtener las curvas IDF y el diseño de lluvias fueron subcontratados, y en la actualidad solo se cuentan con los resultados obtenidos.

El cálculo de las áreas máximas de techos verdes, pavimentos porosos y celdas de bioretención se realizará utilizando bases de datos en el software QGIS, que sirvieron como herramienta gráfica exclusivamente para este proyecto de grado.

Se implementará el algoritmo de optimización utilizando el lenguaje de programación Python, del cual se obtendrán resultados en forma de vectores, gráficos y el modelo final en formato INP compatible con el software SWMM para la obtención definitiva de resultados.

5.7 Formulación del plan de mejora

A partir de la comparación de resultados (antes y después) obtenidos por el software SWMM en términos de volumen de inundaciones, se redacta este plan de mejora que ubique toda el área que deberá ser intervenida para la reducción de picos de escorrentía. En la Ilustración 10 se aprecia la cantidad de área que debe tener cada subcuenca que logrará significativamente la región inundada de la zona. Cada parte del círculo indica los m² que deben instalar de cada tipo de estructura LID, a efectos prácticos la posición de cada m² de estructura LID no interviene en el resultado final (desde que esté dentro de la subcuenca). La empresa estatal deberá tener en

cuenta la parte social que puede implicar la instalación de cada tipo de GI, así como los itinerarios de construcción y permisos.

Ilustración 10. Plan de mejora para el sistema de alcantarillado pluvial de Chía

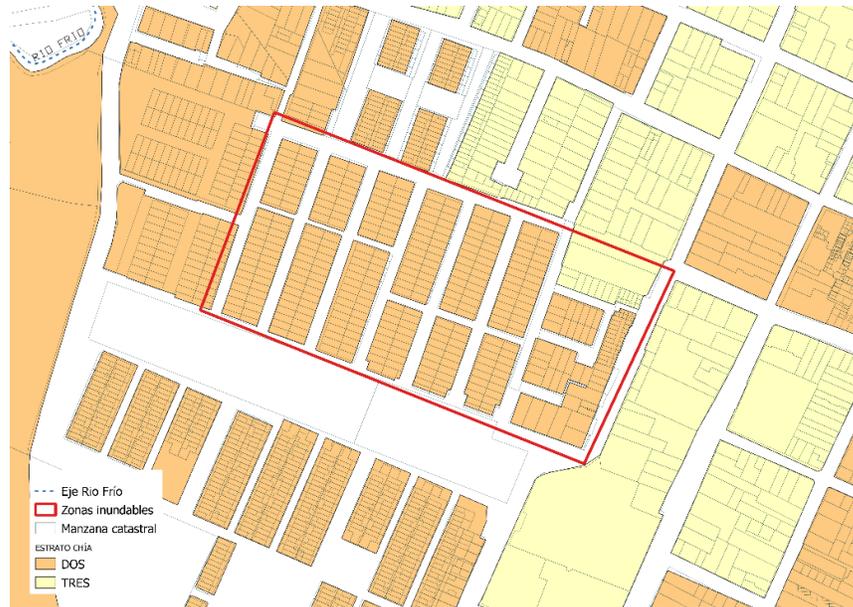


Fuente: Elaboración propia

Se deberá intervenir un área de aproximadamente 49,852.59 m² del barrio Las Acacias. Una vez implementado se logrará una reducción del 30.42% del área potencialmente inundable del casco urbano de Chía hasta el año 2023. Teniendo en cuenta que el área urbana total del municipio de Chía abarca aproximadamente 6,361,305.78 m², y el área potencialmente inundable dentro del casco urbano está en 163,888.67 m² se bajarían los índices de zonas inundables en la zona urbana de Chía hasta el 1.79% frente al área total de la ciudad (2.58% antes de la implementación). Estas cifras beneficiarían a aproximadamente 1,368 habitantes que viven en la zona de estudio según el último censo del DANE, y a poco más de 416 viviendas que sufren actualmente el desagrado y las incomodidades que generan las inundaciones eventuales en esta ubicación.

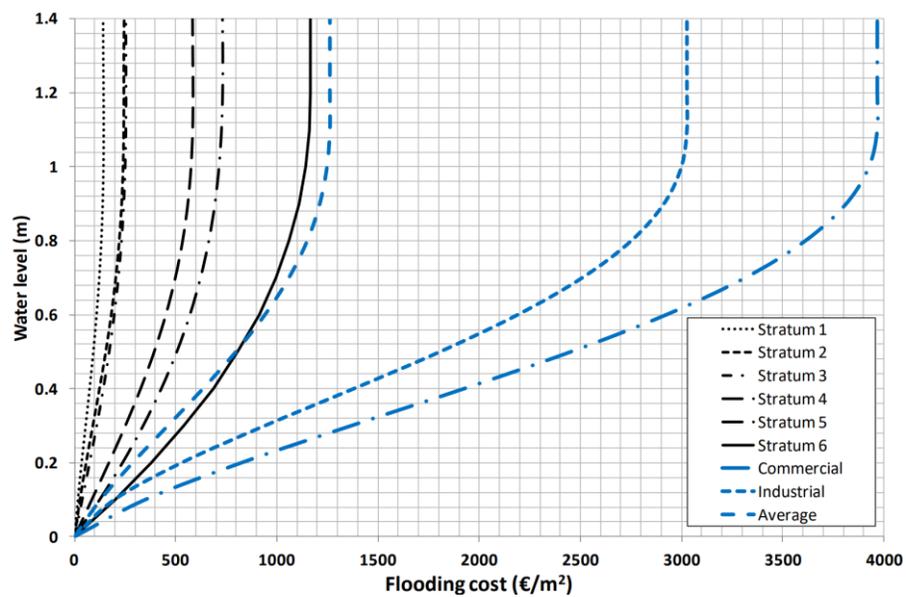
La viabilidad del proyecto se puede obtener por la eventual recuperación de la inversión que tienen que hacer las empresas estatales, que puede ser fácilmente obtenida por los costos que se evitaría la empresa por la profundidad de inundación frente a los tipos de estratos socioeconómicos de Colombia. En la Ilustración 11 se puede apreciar la distribución socioeconómica de la zona de estudio, que, para este caso, es estrato 2 en más del 90% del área inundable y en la Ilustración 12 se pueden ver los costos que dejan las inundaciones en ($\$/m^2$) para cada tipo de estrato socioeconómico. El valor de la lámina de agua inundada que deja cada subcuenca en promedio obtenida del modelo SWMM es de 5 cm - 10 cm, valor que se puede empatar en la Ilustración 12 y obtener un valor del costo de aproximadamente 126,000 COP por metro cuadrado inundado. El valor del área total inundado 49,852.59 m^2 , por lo que, se obtendrían gastos de aproximadamente \$ 6.281.426.340,00 COP cada vez que la lluvia alcance el evento máximo de precipitación representado en la Ilustración 2. El periodo de retorno correspondiente a la lluvia de diseño es de 10 años, por ende, el costo total de daños por inundaciones anualmente será de \$ 628.142.634,00 y se podrá recuperar la inversión inicial (incluyendo mantenimiento por 10 años) en 5,20 años incluyendo inflación promedio de Colombia del (5.52% EA de los últimos 10 años).

Ilustración 11. Estratificación social de la zona de estudio según el último censo (2018) del DANE



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 12. Costos de inundaciones (€/m²) para diferentes estratos sociales y usos de suelo



Fuente: (Iglesias-Rey et al., 2017)

El plan de mejora propuesto ofrece una estrategia integral para abordar las inundaciones en el casco urbano de Chía, Colombia, utilizando SuDS como medida principal de implementación. Se espera que estas acciones contribuyan a reducir la vulnerabilidad de la comunidad ante eventos extremos de lluvia y a promover un desarrollo urbano sostenible y resiliente en la región. Con este inciso se concluye el último objetivo específico y a su vez, el objetivo general de este proyecto.

de 436,000 litros de escorrentía. La inundación inicial para cada nodo de la red se presenta en la siguiente tabla:

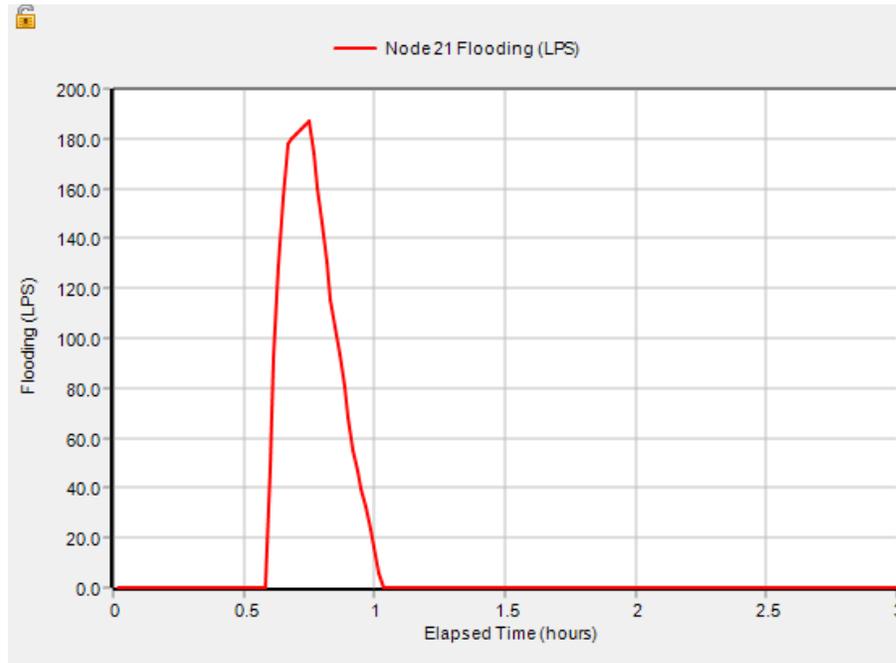
Tabla 5. Resultados iniciales de los nodos inundados en la red

Nº Nodo	Inundación máxima (LPS)	Inundación total (Litros)
5	46.62	28000
7	7.06	3000
11	73.69	46000
15	36.74	13000
17	48.92	30000
18	17.57	7000
20	66.36	31000
21	186.78	169000
22	33.58	14000
24	113.38	95000

Fuente: Elaboración propia

Se formula el algoritmo de optimización para ser corrido en cualquier software de programación de Python. Las variables de decisión serán el área de cada tipo de estructura LID y la función objetivo será el resultado la suma de cada volumen de inundación (Área bajo la curva entre inundación total y tiempo) en cada uno de los nodos. En la Ilustración 14 se ve un ejemplo de esta curva.

Ilustración 14. Gráfica de inundación vs tiempo en el nodo 21 de la red



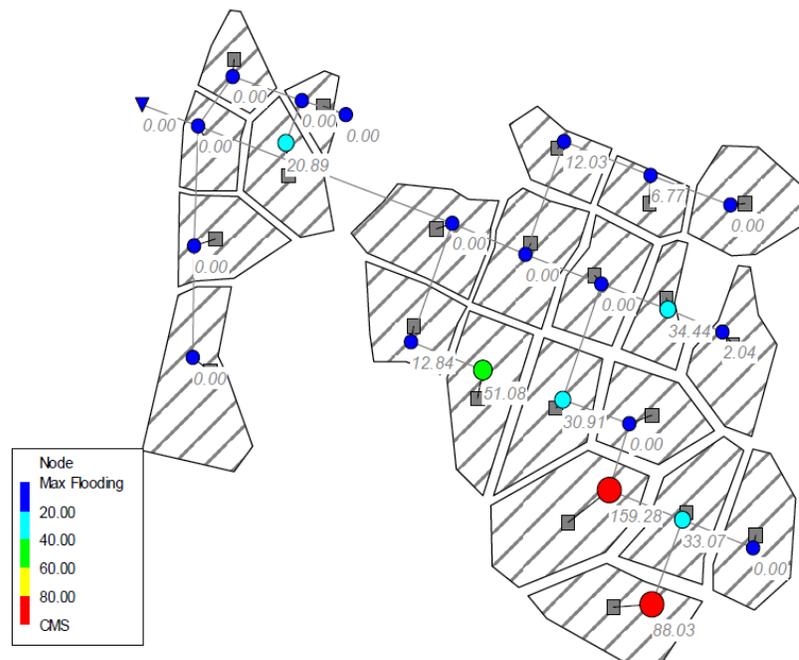
Fuente: Elaboración propia en el software SWMM

La suma total de cada área bajo la curva será minimizada mediante el algoritmo de optimización, las unidades resultantes estarán en LPS/h, donde posteriormente serán convertidas y a volúmenes totales y caudales promedio.

7. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Como se esperaba del inicio, las estructuras LID y en general toda la infraestructura verde, es de las mejores alternativas para tratar de reducir los niveles de escorrentía y poderlos controlar a un nivel muy bajo de costos en comparación con la reparación a nuevas instalaciones de tuberías o cualquier otro sistema de drenaje urbano. El vector solución que mejor optimiza la red tras 40 mil iteraciones con el algoritmo SA se muestra en la Tabla 6. Cantidad de Estructuras LID para cada subcuenca. Igualmente, la siguiente ilustración muestra la reducción de caudal obtenida una vez se integran las estructuras tipo LID en el modelo, resultado del proceso de optimización ejecutado con el algoritmo SA:

Ilustración 15. Estado final de la red (Valores en LPS)



Fuente: Elaboración propia en el software SWMM

Tabla 6. Cantidad de Estructuras LID para cada subcuenca

N° Subcuenca	Área total (ha)	Área techos verdes (m ²)	Área pavimentos porosos (m ²)	Área celdas de bioretención (m ²)
100	0.208	72	450	137
101	0.077	53	187	0
107	0.186	369	225	70
112	0.144	426	300	29
113	0.127	5	291	101
115	0.13	80	351	99
116	0.158	54	536	142
117	0.187	231	232	101
118	0.186	146	302	38
119	0.124	18	630	300
200	0.323	171	261	297
202	0.266	24	439	263
203	0.239	176	610	18
204	0.261	231	430	80
205	0.238	325	399	14
206	0.217	143	605	138
207	0.223	392	266	20
208	0.241	292	440	0
209	0.251	358	240	91

210	0.295	206	730	398
214	0.257	180	380	0
302	0.367	599	570	0

Fuente: Elaboración propia

Utilizando como base esta solución obtenida, se aplican los respectivos cambios a la nueva red en SWMM y se obtienen los resultados en la siguiente tabla:

Tabla 7. Resultados iniciales de los nodos inundados en la red

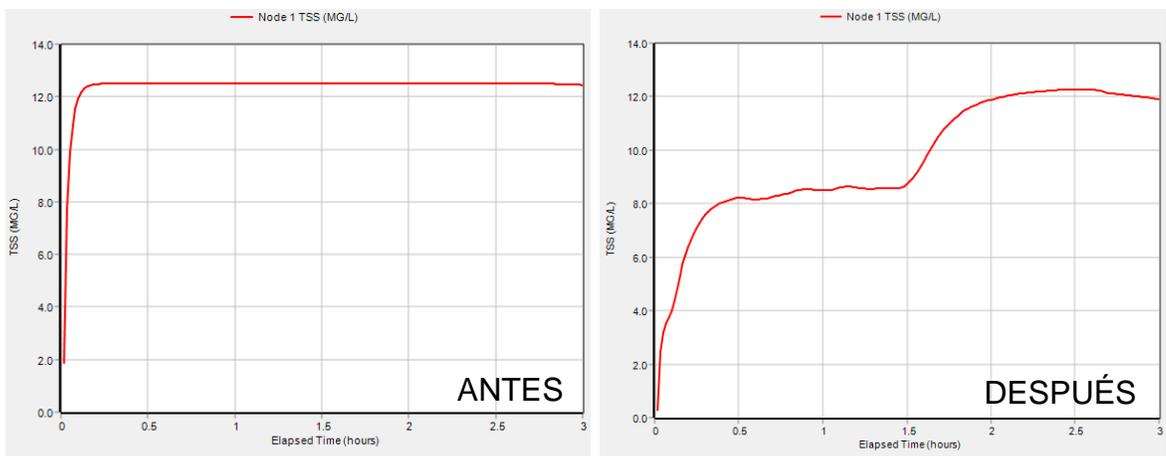
N° Nodo	Inundación máxima (LPS)	Inundación total (Litros)	Reducción con respecto al inicial
5	20.89	9000	67.9%
7	12.84	0	100.0%
11	51.08	28000	39.1%
15	6.77	0	100.0%
17	34.44	16000	46.7%
18	2.04	0	100.0%
20	30.91	10000	67.7%
21	159.28	122000	27.8%
22	33.07	4000	71.4%
24	88.03	61000	35.8%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos mostraron una reducción significativa en el volumen total de escorrentía superficial en los pozos de la red modelada, siendo este del 42.6%

con un valor final de 250,000 litros. Este resultado resalta la efectividad de las estrategias de LID implementadas y su correcta ubicación geográfica de las mismas. Además, en la Ilustración 16 se observa una mejora en la calidad del agua, ya que, estas medidas ayudaron a filtrar contaminantes y a mitigar el impacto de la escorrentía en la calidad del agua superficial y subterránea. Inicialmente la red drenaba una cantidad de 26.988 kg de solidos suspendidos directamente al río Frío, pero con la implementación de los SuDS se logra reducir ese valor a 14.946 kg (por evento de lluvia) representando una reducción del 44.62% de solidos totales suspendidos.

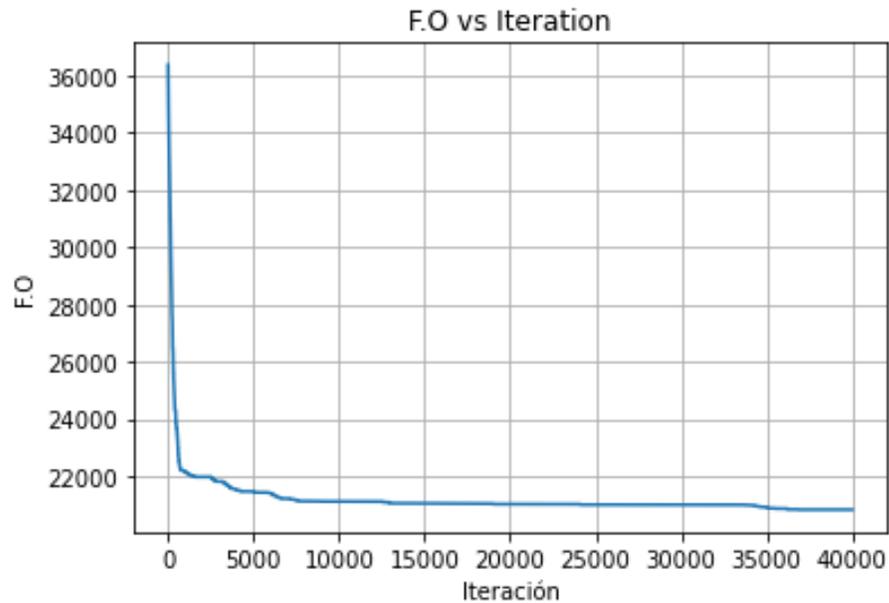
Ilustración 16. Función de solidos suspendidos antes y después de la implementación de las estructuras LID.



Fuente: Elaboración propia en el software SWMM

Se aprecia de manera tangible la efectividad del algoritmo seleccionado en la Ilustración 17 donde en tan solo con 10 mil iteraciones alcanza el mínimo viable de la red optimizando una función objetivo con 66 variables diferentes y ninguna dependiente. El valor final de inversión que deberían hacer las entidades municipales frente a la problemática de las inundaciones en el sector del barrio Las Acacias es de \$ 3.268.869.400,00 COP.

Ilustración 17. Función objetivo (LPS por minuto de lluvia) vs iteraciones



Fuente: Elaboración propia en el software SWMM

Para el estado final de la red, se aprecia como desaparecen inundaciones en tres nodos y se logra una reducción media del 66% de escorrentía en la superficie de todos los nodos. Sumado a esto también se obtienen resultados favorables para la red combinada que atraviesa la red estudiada inicialmente, pues comparten áreas aferentes. Dado que la zona de estudio está ubicada en una zona residencial, la mayoría de los gastos de construcción corresponden al techo verde, pavimentos porosos.

Visualmente, la configuración recomendada de la distribución de las áreas para cada estructura LID se muestra en la Ilustración 10.

8. CONCLUSIONES

El crecimiento urbano en conjunto con los efectos del cambio climático está generando un incremento en la frecuencia de inundaciones, las cuales representan una amenaza significativa para las áreas urbanas. Como resultado, se están implementando nuevas estrategias y técnicas de gestión para hacer frente a este desafío emergente. Para abordar las persistentes inundaciones de los últimos años, se ha propuesto un plan de mejora que servirá como guía para los responsables de tomar decisiones y los gestores urbanos. Este plan abarca diversas etapas, como el diseño, la optimización, la estimación de costos, la evaluación de la viabilidad y la selección de los escenarios más viables de los tipos SuDS que Emserchía podría considerar como alternativa para mitigar las inundaciones. Se estima que esta propuesta puede reducir los niveles de inundación hasta en un 42.6% en la única zona relativamente grande dentro del casco urbano que ha experimentado problemas de inundación, beneficiando a aproximadamente 1400 personas y logrando ahorros aproximados de \$ 628.142.634,00 COP anuales en daños al ambiente y a los inmuebles de la zona.

Los resultados muestran que la combinación de estructuras tipo SuDS para el conjunto subcuencas estudiadas que mejor se adaptan al entorno urbano en el que estas se encuentran son los techos verdes, pavimentos porosos y celdas de bioretención. La combinación que más logra optimizar la red total en términos de inundaciones es la propuesta en el plan de mejora donde prevalece la presencia de pavimentos porosos, seguido de los techos verdes y finalmente las celdas de bioretención. Se determinó teóricamente que esta combinación logra reducir hasta el 100% del volumen de escorrentía en 3 de los 10 nodos inicialmente inundados.

Se logró modelar el sistema de drenaje urbano inicial y compararlo con el modelo final incluyendo todas las variables de decisión planteadas en la función objetivo teniendo como partida la base de datos proporcionada por Emserchía, además de

valores encontrados en la literatura sobre estructuras LID, costes y parámetros globales. No se supuso ni se aproximó ninguna de las variables, pues todo el proceso se trabajó de la mano del área de ingeniería de Emserchía. El modelo hidráulico sirvió base para poder calcular las condiciones futuras incluyendo el potencial de la infraestructura verde en términos de reducción de esorrentía.

Se propuso un plan de mejora adaptado a las necesidades del municipio, basados en el presupuesto inicial planteado por Emserchía como número posible de inversión a medio-largo plazo, todo esto basado en los resultados de optimización que generó el algoritmo SA después de 40 mil iteraciones. El plan de mejora está diseñado para implementar únicamente las estructuras necesarias para alcanzar la mayor eficiencia de reducción, pues se demostró que no en todos los casos, mayor inversión significa mayor reducción de inundación.

9. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Las estructuras LID, en general, demuestran eficiencia en la reducción del flujo de escorrentía y las cargas de sólidos suspendidos (SST) en los sistemas de drenaje. Existen numerosos métodos y algoritmos para determinar las mejores combinaciones para cada tipo de entorno y para cada caso específico. Es posible dirigir esfuerzos adicionales hacia la exploración de algoritmos más eficientes y funciones multiobjetivo que incorporen variables adicionales para definir de manera más precisa el escenario que mejor se adapte a la zona a estudiar.

Este proyecto de grado proporciona una base sólida para futuras intervenciones de gestión de aguas pluviales en la región, destacando la viabilidad y el potencial de las soluciones basadas en la infraestructura verde para abordar los desafíos relacionados con la escorrentía superficial y la calidad del agua en entornos urbanos. Los resultados obtenidos pueden ser de gran utilidad para llevar a cabo una evaluación exhaustiva de los sistemas de aguas pluviales urbanas y para desarrollar soluciones LID rentables. No obstante, se sugiere que investigaciones futuras consideren una variedad más amplia de criterios, como la calidad del agua de escorrentía y el impacto en el paisaje urbano, para una comprensión más completa y detallada de la problemática y las soluciones potenciales.

Teniendo en cuenta la rentabilidad a largo plazo que este tipo de estructuras le generan a las entidades encargadas del mantenimiento y diseño de redes de drenaje, se debería empezar a investigar en la posibilidad de hacer de la implementación de SuDS un modelo de negocio a pequeña y gran escala en ciudades pobladas de Colombia. Los resultados obtenidos de carácter técnico muestran que la reducción de inundaciones en el ámbito urbano es mayor con presencia de pavimentos porosos, se sugiere hacer uso de este tipo de SuDS en entornos urbanos de todo Colombia en la medida de lo posible evitando presentes y futuros problemas de inundación.

10. REFERENCIAS

- Alcaldía Municipal de Chía. (2020a). *Documento de Diagnóstico. Tomo III. Dimensión Sociocultural*. <https://www.chia-cundinamarca.gov.co/2020/POT/3.%20DIMENSI%C3%93N%20SOCIOCULTURAL.pdf>
- Alcaldía Municipal de Chía. (2020b, November 5). *Efectos de la ola invernal impactan sectores del Municipio*.
- Alcaldía Municipal de Chía. (2022). *Estudios Básicos de Riesgo Chía-Cundinamarca (Inundación)*. https://pot.chia-cundinamarca.gov.co/documentos2022/EBR%20Movimientos%20en%20Mas_a_PUB.pdf
- Aparicio Uribe, C. H., Bonilla Brenes, R., & Hack, J. (2022). Potential of retrofitted urban green infrastructure to reduce runoff - A model implementation with site-specific constraints at neighborhood scale. *Urban Forestry and Urban Greening*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127499>
- Catalano de Sousa, M. R., Montalto, F. A., & Gurian, P. (2016). Evaluating Green Infrastructure Stormwater Capture Performance under Extreme Precipitation. *Journal of Extreme Events*, 03(02), 1650006. <https://doi.org/10.1142/S2345737616500068>
- Catimay, J. T., Marely Gallo Martínez, L., & Mancipe, N. A. (2018). MODELACIÓN MATEMÁTICA DE TECHOS VERDES EN COLOMBIA: SELECCIÓN DE UN MODELO MEDIANTE LA METODOLOGÍA AHP Selection of a mathematical model through the AHP methodology to model green roofs in Colombia. *DOI Rev. Ing. Investig. Desarro*, 18(2), 35–46. <https://doi.org/10.19053/issn.1900-771X>
- Cubides, E. D., Santos, G. E., Cubides, E. D., & Santos, G. E. (2018). Control de escorrentías urbanas mediante Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS): Pozos/Zanjas de infiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 12(24), 32–42. <https://doi.org/10.31908/19098367.3813>

- Cunha, M. C., Zeferino, J. A., Simões, N. E., & Saldarriaga, J. G. (2016). Optimal location and sizing of storage units in a drainage system. *Environmental Modelling & Software*, 83, 155–166. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2016.05.015>
- Díaz Jaramillo, C. (n.d.). *Valoración Económica de Techos Verdes en Bogotá*.
- Dietz, M. E. (2007). Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 186(1–4), 351–363. <https://doi.org/10.1007/S11270-007-9484-Z/METRICS>
- DPN. (2017). *Construcción Colector de aguas lluvias calle 29 del Municipio de Chía Cundinamarca - Terminación Chía*. <http://www.chia-cundinamarca.gov.co/2019/estatutoanticorruccion/Informes/PROYECTOS%20EJECUTADOS%202018/CALLE%2029.pdf>
- Emserchía E.S.P. (2019). *Estudios y documentos previos invitación pública, invitación privada y concurso de méritos*.
- Endreny, T., Santagata, R., Perna, A., Stefano, C. De, Rallo, R. F., & Ulgiati, S. (2017). Implementing and managing urban forests: A much needed conservation strategy to increase ecosystem services and urban wellbeing. *Ecological Modelling*, 360, 328–335. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2017.07.016>
- Fu, X., Liu, J., Wang, Z., Wang, D., Shao, W., Mei, C., Wang, J., & Sang, Y. (2023). Quantifying and assessing the infiltration potential of green infrastructure in urban areas using a layered hydrological model. *Journal of Hydrology*, 618, 128626. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128626>
- Ghodsi, S. H., Zahmatkesh, Z., Goharian, E., Kerachian, R., & Zhu, Z. (2020). Optimal design of low impact development practices in response to climate change. *Journal of Hydrology*, 580, 124266. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.124266>
- Ghodsi, S. H., Zhu, Z., Matott, L. S., Rabideau, A. J., & Torres, M. N. (2023). Optimal siting of rainwater harvesting systems for reducing combined sewer overflows

- at city scale. *Water Research*, 230, 119533.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119533>
- Gong, Y., Yin, D., Li, J., Zhang, X., Wang, W., Fang, X., Shi, H., & Wang, Q. (2019). Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments. *Science of The Total Environment*, 687, 505–515. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.100>
- Guia de Sistema Urbanos de Drenaje Sostenible- Documento Tecnico de soporte - SUDS by SDA2015 - Issuu.* (n.d.). Retrieved April 27, 2024, from https://issuu.com/sda2015/docs/gu_a_t_cnica_de_dise_o_y_construcci
- Huang, C. L., Hsu, N. S., Liu, H. J., & Huang, Y. H. (2018). Optimization of low impact development layout designs for megacity flood mitigation. *Journal of Hydrology*, 564, 542–558. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2018.07.044>
- Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., Saldarriaga, J. G., & Navarro-Planas, V. R. (2017). Pseudo-genetic Model Optimization for Rehabilitation of Urban Storm-water Drainage Networks. *Procedia Engineering*, 186, 617–625. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.278>
- Ju, X., Li, W., Li, J., He, L., Mao, J., & Han, L. (2023). Future climate change and urban growth together affect surface runoff in a large-scale urban agglomeration. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104970. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2023.104970>
- Karovic, O., & Mays, L. W. (2014). Sewer System Design Using Simulated Annealing in Excel. *Water Resources Management*, 28(13), 4551–4565. <https://doi.org/10.1007/S11269-014-0750-8/METRICS>
- Kong, F., Ban, Y., Yin, H., James, P., & Dronova, I. (2017). Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development. *Environmental Modelling & Software*, 95, 132–142. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2017.06.021>
- Li, C., Liu, M., Hu, Y., Zhou, R., Wu, W., & Huang, N. (2021). Evaluating the runoff storage supply-demand structure of green infrastructure for urban flood

- management. *Journal of Cleaner Production*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124420>
- Li, S., Wang, Z., Wu, X., Zeng, Z., Shen, P., & Lai, C. (2022). A novel spatial optimization approach for the cost-effectiveness improvement of LID practices based on SWMM-FTC. *Journal of Environmental Management*, 307, 114574. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.114574>
- Liu, T., Lawluyv, Y., Shi, Y., & Yap, P. S. (2021). Low Impact Development (LID) Practices: A Review on Recent Developments, Challenges and Prospects. *Water, Air, & Soil Pollution 2021* 232:9, 232(9), 1–36. <https://doi.org/10.1007/S11270-021-05262-5>
- Liu, Y., Ahiablame, L. M., Bralts, V. F., & Engel, B. A. (2015). Enhancing a rainfall-runoff model to assess the impacts of BMPs and LID practices on storm runoff. *Journal of Environmental Management*, 147, 12–23. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2014.09.005>
- Martínez, C., Sanchez, A., Galindo, R., Mulugeta, A., Vojinovic, Z., & Galvis, A. (2018). Configuring Green Infrastructure for Urban Runoff and Pollutant Reduction Using an Optimal Number of Units. *Water 2018, Vol. 10, Page 1528*, 10(11), 1528. <https://doi.org/10.3390/W10111528>
- McDonnell, B., Ratliff, K., Tryby, M., Wu, J., & Mullapudi, A. (2020). PySWMM: The Python Interface to Stormwater Management Model (SWMM). *Journal of Open Source Software*, 5(52), 2292. <https://doi.org/10.21105/joss.02292>
- Minvivienda. (2015). *REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO RAS*.
- Nazari, A., Roozbahani, A., & Hashemy Shahdany, S. M. (2023). Integrated SUSTAIN-SWMM-MCDM Approach for Optimal Selection of LID Practices in Urban Stormwater Systems. *Water Resources Management*, 37(9), 3769–3793. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03526-9>
- Novotný, M., Marković, M., Raček, J., Šipka, M., Chorazy, T., Tošić, I., & Hlavínek, P. (2023). The use of biochar made from biomass and biosolids as a substrate

- for green infrastructure: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.100999>
- Oliveira, M., Santagata, R., Kaiser, S., Liu, Y., Vassillo, C., Ghisellini, P., Liu, G., & Ulgiati, S. (2022). Socioeconomic and Environmental Benefits of Expanding Urban Green Areas: A Joint Application of i-Tree and LCA Approaches. *Land*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/land11122106>
- Oxley, R. L., & Mays, L. W. (2014). Optimization - Simulation Model for Detention Basin System Design. *Water Resources Management*, 28(4), 1157–1171. <https://doi.org/10.1007/S11269-014-0552-Z/METRICS>
- Platz, M., Simon, M., & Tryby, M. (2020). Testing of the Storm Water Management Model Low Impact Development Modules. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 56(2), 283–296. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12832>
- Rangarajan, S., Marton, D., Montalto, F., Cheng, Z. J., & Smith, G. (2015). Measuring the flow: green infrastructure grows in Brooklyn. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 17, 36–41. <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2015.09.001>
- Roobahani, A., Behzadi, P., & Massah Bavani, A. (2020). Analysis of performance criteria and sustainability index in urban stormwater systems under the impacts of climate change. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122727. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.122727>
- Sahana, M., Hong, H., & Sajjad, H. (2018). Analyzing urban spatial patterns and trend of urban growth using urban sprawl matrix: A study on Kolkata urban agglomeration, India. *Science of The Total Environment*, 628–629, 1557–1566. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.02.170>
- Saldarriaga, J., Salcedo, C., Solarte, L., Pulgarín, L., Rivera, M. L., Camacho, M., Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., & Cunha, M. (2020). Reducing Flood Risk in Changing Environments: Optimal Location and Sizing of Stormwater Tanks Considering Climate Change. *Water* 2020, Vol. 12, Page 2491, 12(9), 2491. <https://doi.org/10.3390/W12092491>

- Shuster, W. D., Bonta, J., Thurston, H., Warnemuende, E., & Smith, D. R. (2005). Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water Journal*, 2(4), 263–275. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-35349019594&partnerID=40&md5=b71bc8edc2df0f62b7661a6e6ebddb02>
- Taghizadeh, S., Khani, S., & Rajaei, T. (2021). Hybrid SWMM and particle swarm optimization model for urban runoff water quality control by using green infrastructures (LID-BMPs). *Urban Forestry and Urban Greening*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127032>
- Wang, J., & Banzhaf, E. (2018). Towards a better understanding of Green Infrastructure: A critical review. *Ecological Indicators*, 85, 758–772. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.018>
- Wang, M., Liu, M., Zhang, D., Zhang, Y., Su, J., Zhou, S., Bakhshipour, A. E., & Tan, S. K. (2023). Assessing hydrological performance for optimized integrated grey-green infrastructure in response to climate change based on shared socio-economic pathways. *Sustainable Cities and Society*, 91, 104436. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2023.104436>
- Willems, P., Arnbjerg-Nielsen, K., Olsson, J., & Nguyen, V. T. V. (2012). Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Atmospheric Research*, 103, 106–118. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2011.04.003>
- Wolch, J. R., Byrne, J., & Newell, J. P. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities ‘just green enough.’ *Landscape and Urban Planning*, 125, 234–244. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2014.01.017>
- Yang, B., Zhang, T., Li, J., Feng, P., & Miao, Y. (2023). Optimal designs of LID based on LID experiments and SWMM for a small-scale community in Tianjin, north China. *Journal of Environmental Management*, 334, 117442. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.117442>
- Yin, D., Evans, B., Wang, Q., Chen, Z., Jia, H., Chen, A. S., Fu, G., Ahmad, S., & Leng, L. (2020). Integrated 1D and 2D model for better assessing runoff quantity

control of low impact development facilities on community scale. *Science of The Total Environment*, 720, 137630.

<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.137630>

Yu, Y., Zhou, Y., Guo, Z., van Duin, B., & Zhang, W. (2022). A new LID spatial allocation optimization system at neighborhood scale: Integrated SWMM with PICEA-g using MATLAB as the platform. *Science of The Total Environment*, 831, 154843. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.154843>

Zhang, Z., Hu, W., Wang, W., Zhou, J., Liu, D., Qi, X., & Zhao, X. (2022). The hydrological effect and uncertainty assessment by runoff indicators based on SWMM for various LID facilities. *Journal of Hydrology*, 613, 128418. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2022.128418>

11. ANEXOS

11.1 Algoritmo de optimización implementado en Spyder

```
from pyswmm import Simulation, Nodes, Links, Subcatchment, Subcatchments, swmm5, LidGroups
from pyswmm.swmm5 import PYSWMMException
from pyswmm.toolkitapi import ObjectType, SubcParams, SubcPollut, SubcResults, LidUParams,
LidUOptions, NodeResults, NodePollut
from pyswmm.toolkitapi import LidResults, LidLayers, LidLayersProperty, SimulationTime,
SimulationUnits, SimulationParameters
from pyswmm.lidlayers import Surface, Soil, Storage, Pavement, Drain, DrainMat
from colorama import init, Fore, Back, Style
import numpy as np
from scipy import integrate
import matplotlib.pyplot as plt
import random
import time
direccion="C:/Users/alfon/Downloads/Final/"
x = np.zeros(66)
nodes_to_monitor=["2","3","4","5","6","7","8","9","10","11","12","13","14","15","16","17","18","19","
20","21","22","23","24"]
dolar = 4000
inp_file_path = 'RedPluvialChia.inp'
output_file_path = 'RedPluvialChiaV0.inp'
current_section = None
modified_lines = []
inside_subcatchments_section = False
found_first_row = False
with open(inp_file_path, 'r') as inp_file:
    for line in inp_file:
        # Elimina espacios en blanco al principio y al final de la línea
        line = line.strip()
        # Verifica si estamos cambiando de sección
        if line.startswith('(') and line.endswith(')'):
            current_section = line
            modified_lines.append(line)
            # Verifica si estamos dentro de la sección de interés [SUBCATCHMENTS]
            inside_subcatchments_section = current_section == '[LID_USAGE]'
            found_first_row = False
        elif inside_subcatchments_section:
            if found_first_row:
                parts = line.split()
                # Si la línea contiene al menos 8 columnas (nombre, Rain Gage, Outlet, Área,
                %Imperv, Width, %Slope, CurbLen, SnowPack)
                if len(parts) >= 8:
                    subcatchment_name = parts[0] # El nombre de la subcuenca es el
                    primer elemento en la línea
                    new_area = int(0)
                    parts[2] = str(new_area) # Modifica el área de la subcuenca (columna
                    3)

                    modified_line = ' '.join(parts) + '\n'
                    modified_lines.append(modified_line)
```

```

        else:
            modified_lines.append(line)
    else:
        modified_lines.append(line)
        found_first_row = True
    else:
        modified_lines.append(line)
with open(output_file_path, 'w') as output_file:
    for line in modified_lines:
        output_file.write(line + '\n')
# Crear un diccionario para almacenar los resultados de cada nodo
swmm_model = swmm5.PySWMM(r'RedPluvialChiaV0.inp')
swmm_model.swmm_open()
swmm_model.swmm_start(True)
node_results = {node: np.array([]) for node in nodes_to_monitor}
i = 1
while True:
    t = swmm_model.swmm_step()
    if i % 12 == 0:
        for node in nodes_to_monitor:
            node_result = swmm_model.getNodeResult(node, NodeResults.overflow.value)
            node_results[node] = np.append(node_results[node], node_result)
        i += 1
    if t <= 0.0:
        break
swmm_model.swmm_end()
swmm_model.swmm_close()
# Calcular la integral para cada nodo y sumarlas
total_integral = 0
for node, results in node_results.items():
    integral = integrate.trapezoid(results)
    total_integral += integral
print(total_integral)
def custom_function(x):
    area_mapping = {
        100: {'TechosVerdes': x[0], 'PavimentoPermeable': x[1], 'CeldaBioretencion': x[2]},
        101: {'TechosVerdes': x[3], 'PavimentoPermeable': x[4], 'CeldaBioretencion': x[5]},
        107: {'TechosVerdes': x[6], 'PavimentoPermeable': x[7], 'CeldaBioretencion': x[8]},
        112: {'TechosVerdes': x[9], 'PavimentoPermeable': x[10], 'CeldaBioretencion': x[11]},
        113: {'TechosVerdes': x[12], 'PavimentoPermeable': x[13], 'CeldaBioretencion': x[14]},
        115: {'TechosVerdes': x[15], 'PavimentoPermeable': x[16], 'CeldaBioretencion': x[17]},
        116: {'TechosVerdes': x[18], 'PavimentoPermeable': x[19], 'CeldaBioretencion': x[20]},
        117: {'TechosVerdes': x[21], 'PavimentoPermeable': x[22], 'CeldaBioretencion': x[23]},
        118: {'TechosVerdes': x[24], 'PavimentoPermeable': x[25], 'CeldaBioretencion': x[26]},
        119: {'TechosVerdes': x[27], 'PavimentoPermeable': x[28], 'CeldaBioretencion': x[29]},
        200: {'TechosVerdes': x[30], 'PavimentoPermeable': x[31], 'CeldaBioretencion': x[32]},
        202: {'TechosVerdes': x[33], 'PavimentoPermeable': x[34], 'CeldaBioretencion': x[35]},
        203: {'TechosVerdes': x[36], 'PavimentoPermeable': x[37], 'CeldaBioretencion': x[38]},
        204: {'TechosVerdes': x[39], 'PavimentoPermeable': x[40], 'CeldaBioretencion': x[41]},
        205: {'TechosVerdes': x[42], 'PavimentoPermeable': x[43], 'CeldaBioretencion': x[44]},
        206: {'TechosVerdes': x[45], 'PavimentoPermeable': x[46], 'CeldaBioretencion': x[47]},
        207: {'TechosVerdes': x[48], 'PavimentoPermeable': x[49], 'CeldaBioretencion': x[50]},
        208: {'TechosVerdes': x[51], 'PavimentoPermeable': x[52], 'CeldaBioretencion': x[53]},
        209: {'TechosVerdes': x[54], 'PavimentoPermeable': x[55], 'CeldaBioretencion': x[56]},
        210: {'TechosVerdes': x[57], 'PavimentoPermeable': x[58], 'CeldaBioretencion': x[59]},
    }

```

```

214: {'TechosVerdes': x[60], 'PavimentoPermeable': x[61], 'CeldaBioretencion': x[62]},
302: {'TechosVerdes': x[63], 'PavimentoPermeable': x[64], 'CeldaBioretencion': x[65]}
inp_file_path = 'RedPluvialChia.inp'
output_file_path = 'RedPluvialChiaV1.inp'
current_section = None
modified_lines = []
inside_subcatchments_section = False
found_first_row = False
with open(inp_file_path, 'r') as inp_file:
    for line in inp_file:
        # Elimina espacios en blanco al principio y al final de la línea
        line = line.strip()
        # Verifica si estamos cambiando de sección
        if line.startswith('(') and line.endswith(')'):
            current_section = line
            modified_lines.append(line)
            # Verifica si estamos dentro de la sección de interés [SUBCATCHMENTS]
            inside_subcatchments_section = current_section == '[LID_USAGE]'
            found_first_row = False
        elif inside_subcatchments_section:
            if found_first_row:
                parts = line.split()
                # Si la línea contiene al menos 8 columnas (nombre, Rain Gage, Outlet,
                Área, %Imperv, Width, %Slope, CurbLen, SnowPack)
                if len(parts) >= 8:
                    try:
                        subcatchment_name = int(parts[0])
                        subcatchment_type = parts[1]
                        if subcatchment_name in area_mapping:
                            new_area =
area_mapping[subcatchment_name].get(subcatchment_type, 0)
                            parts[2] = str(new_area)
                        except ValueError:
                            # Si el primer elemento no es un número entero, pasa al
siguiente
                            pass
                        modified_line = ' '.join(parts) + '\n'
                        modified_lines.append(modified_line)
                    else:
                        modified_lines.append(line)
                else:
                    modified_lines.append(line)
                    found_first_row = True
            else:
                modified_lines.append(line)
with open(output_file_path, 'w') as output_file:
    for line in modified_lines:
        output_file.write(line + '\n')

swmm_model1 = swmm5.PySWMM(direccion+'RedPluvialChiaV1.inp')
swmm_model1.swmm_open()
swmm_model1.swmm_start(True)
node_results1 = {node1: np.array([]) for node1 in nodes_to_monitor}
k = 1
while True:

```

```

t1 = swmm_model1.swmm_step()
if k % 12 == 0:
    for node1 in nodes_to_monitor:
        node_result1 = swmm_model1.getNodeResult(node1,
NodeResults.overflow.value)
        node_results1[node1] = np.append(node_results1[node1], node_result1)
    k += 1
    if t1 <= 0.0:
        break
swmm_model1.swmm_end()
swmm_model1.swmm_close()
# Calcular la integral para cada nodo y sumarlas
total_integral1 = 0
for node1, results1 in node_results1.items():
    integral = integrate.trapezoid(results1)
    total_integral1 += integral
return total_integral1
def clip_to_bounds(x, bounds):
    """Ajusta x para que esté dentro de los límites especificados por bounds"""
    return np.clip(x, bounds[:, 0], bounds[:, 1])
def generate_new_state(current_state, bounds):
    """Genera un nuevo estado vecino dentro de los límites especificados"""
    new_state = current_state + np.random.normal(0, 10, size=current_state.shape)
    return clip_to_bounds(new_state, bounds)
def simulated_annealing(objective_function, initial_state, bounds, temperature, cooling_rate,
num_iterations):
    """Algoritmo de recocido simulado"""
    current_state = initial_state
    current_state = clip_to_bounds(current_state, bounds) # Asegurarse de que el estado
inicial cumple con las restricciones
    current_cost = objective_function(current_state)
    best_state = current_state
    best_cost = current_cost
    costs = [best_cost] # Lista para almacenar los costos en cada iteración
    for j in range(num_iterations):
        time1=time.time()
        # Generar un nuevo estado vecino dentro de los límites especificados
        new_state = generate_new_state(current_state, bounds)
        # Calcular el costo del nuevo estado
        new_cost = objective_function(new_state)
        # Si el nuevo estado es mejor, aceptarlo
        if new_cost < current_cost:
            current_state = new_state
            current_cost = new_cost

        # Actualizar el mejor estado encontrado
        if new_cost < best_cost:
            best_state = new_state
            best_cost = new_cost
    else:
        # Si el nuevo estado es peor, aceptarlo con una cierta probabilidad
        if np.random.rand() < np.exp(-(new_cost - current_cost) / temperature):
            current_state = new_state
            current_cost = new_cost

```

```

        # Enfriar la temperatura
        temperature *= cooling_rate
        costs.append(best_cost) # Agregar el mejor costo encontrado en esta iteración
        time2=time.time()
        #tiempo=time2-time1
        #print("T "+str(j+1)+": "+str(tiempo))
    return best_state, best_cost, costs
# Definir los parámetros del algoritmo
initial_state= np.zeros(66) # Estado inicial aleatorio con 8 variables
initial_state[1]=15
    bounds = np.array([
        [0, 1420],[0, 450],[0, 210],[0, 480],[0, 190],[0, 0],[0, 1350],[0, 230],[0, 70], [0, 930],[0,
300],[0, 60], [0, 690],[0, 310],[0, 210],[0, 170],[0, 550],[0, 410],[0, 430],[0, 540],[0, 240],[0,
1310],[0, 250],[0, 110],[0, 470],[0, 930],[0, 250],[0, 370],[0, 630],[0, 300],[0, 300],[0, 1330],[0,
1280], [0, 1230],[0, 970],[0, 280], [0, 1140],[0, 610],[0, 120], 0, 1830],[0, 430],[0, 80], [0,
1680],[0, 400],[0, 30], [0, 1120],[0, 610],[0, 160], [0, 1680],[0, 280],[0, 50], [0, 1680],[0, 440],[0,
20], [0, 1860],[0, 240],[0, 300], 0, 1530],[0, 730],[0, 460], 0, 1900],[0, 380],[0, 0], 0, 2670],[0,
570],[0, 20])) # Límites para cada variable
temperature = 100.0
cooling_rate = 0.95
num_iteations = 40000
# Ejecutar el algoritmo de recocido simulado
best_state, best_cost, costs = simulated_annealing(custom_function, initial_state, bounds,
temperature, cooling_rate, num_iteations)
# Imprimir el resultado
print("Mejor combinación:", best_state)
print("Escorrentía Final:", best_cost)
def multiplicar_valores(y):
    # Definir los factores de multiplicación para cada tipo de área
    factor_techos_verdes = 187
    factor_pavimento_permeable = 38.4
    factor_celdas_bioretencion = 10.5
    # Copiar el vector y para evitar modificar el original
    y_modificado = y.astype(float) # Convertir a float para evitar problemas de tipos
    # Multiplicar los valores correspondientes a cada tipo de área por los factores de
multiplicación
    y_modificado[0::3] *= factor_techos_verdes # Multiplica cada tercer valor (Techos Verdes)
    y_modificado[1::3] *= factor_pavimento_permeable # Multiplica cada tercer valor
empezando desde el segundo (Pavimento Permeable)
    y_modificado[2::3] *= factor_celdas_bioretencion # Multiplica cada tercer valor empezando
desde el tercero (Celdas Bioretención)
    return y_modificado.astype(int) # Convertir de nuevo a entero al final
# Ejemplo de vector y
y = best_state
# Multiplicar los valores del vector y
y_modificado = multiplicar_valores(y)
suma_por_elemento = (np.sum(y_modificado))*dolar
print("\nSuma de cada elemento del vector modificado:", suma_por_elemento)
# Graficar los costos en función del número de iteraciones
plt.plot(range(num_iteations + 1), costs)
plt.xlabel('Iteración')
plt.ylabel('F.O')
plt.title('F.O vs Iteration')
plt.grid(True)
plt.show()

```

11.2 Datos de flujo en todos los nodos del estado inicial de la red

Node	Type	Maximum Lateral Inflow LPS	Maximum Total Inflow LPS	Day of Maximum Inflow	Hour of Maximum Inflow	Lateral Inflow Volume 10 ^{^6} ltr	Total Inflow Volume 10 ^{^6} ltr	Flow Balance Error %
2	JUNCTION	41.61	956.77	0	00:45	0.0669	2.16	0.036
3	JUNCTION	42.95	86.61	0	00:45	0.0697	0.198	0.002
4	JUNCTION	63.08	150.38	0	00:45	0.102	0.26	-0.020
5	JUNCTION	70.71	70.71	0	00:45	0.115	0.115	0.038
6	JUNCTION	0.00	52.82	0	00:53	0	0.128	-0.000
7	JUNCTION	26.73	26.73	0	00:45	0.0434	0.0434	-0.067
8	JUNCTION	87.31	87.31	0	00:45	0.158	0.158	-0.025
9	JUNCTION	90.41	683.91	0	00:40	0.147	1.63	0.003
10	JUNCTION	64.73	81.24	0	00:40	0.105	0.205	-0.028
11	JUNCTION	90.15	90.15	0	00:45	0.147	0.147	0.023
12	JUNCTION	82.47	522.81	0	00:39	0.134	1.28	0.030
13	JUNCTION	74.94	312.86	0	00:38	0.121	0.867	-0.033
14	JUNCTION	53.62	160.15	0	00:39	0.0866	0.281	0.031
15	JUNCTION	43.22	129.40	0	00:45	0.0693	0.208	-0.099
16	JUNCTION	86.19	86.19	0	00:45	0.139	0.139	0.091
17	JUNCTION	49.88	115.70	0	00:45	0.0807	0.21	0.015
18	JUNCTION	83.43	83.43	0	00:45	0.136	0.136	0.030
19	JUNCTION	77.29	158.99	0	00:35	0.125	0.464	-0.026
20	JUNCTION	82.43	206.47	0	00:45	0.134	0.598	0.023
21	JUNCTION	126.96	233.61	0	00:45	0.207	0.508	-0.007
22	JUNCTION	89.17	153.65	0	00:45	0.145	0.324	0.004
23	JUNCTION	64.48	64.48	0	00:45	0.104	0.104	0.061
24	JUNCTION	100.08	113.42	0	00:45	0.161	0.17	-0.004
1	OUTFALL	0.00	955.78	0	00:45	0	2.16	0.000

Fuente: Elaboración propia en el software SWMM

11.3 Datos de flujo en todos los nodos después de utilizar SuDS

Node	Type	Maximum Lateral Inflow LPS	Maximum Total Inflow LPS	Day of Maximum Inflow	Hour of Maximum Inflow	Lateral Inflow Volume 10 ^{^6} ltr	Total Inflow Volume 10 ^{^6} ltr	Flow Balance Error %
2	JUNCTION	30.78	885.78	0	00:45	0.0472	1.77	0.032
3	JUNCTION	20.33	75.11	0	00:45	0.0292	0.14	-0.023
4	JUNCTION	52.93	137.95	0	00:45	0.0837	0.226	-0.004
5	JUNCTION	55.52	55.52	0	00:45	0.0876	0.0876	0.069
6	JUNCTION	0.00	56.27	0	00:48	0	0.111	-0.080
7	JUNCTION	20.15	20.15	0	00:45	0.0322	0.0322	-0.029
8	JUNCTION	85.02	85.02	0	00:45	0.142	0.142	0.020
9	JUNCTION	75.48	648.50	0	00:40	0.119	1.36	-0.003
10	JUNCTION	56.07	80.02	0	00:40	0.0874	0.178	-0.082
11	JUNCTION	74.93	74.93	0	00:45	0.119	0.119	0.024
12	JUNCTION	61.28	494.53	0	00:40	0.0975	1.06	0.036
13	JUNCTION	53.53	308.65	0	00:38	0.0836	0.739	-0.039
14	JUNCTION	35.29	145.22	0	00:44	0.0546	0.227	0.054
15	JUNCTION	33.15	110.47	0	00:45	0.0519	0.172	-0.080
16	JUNCTION	77.32	77.32	0	00:45	0.12	0.12	0.089
17	JUNCTION	38.73	104.55	0	00:45	0.0587	0.166	0.062
18	JUNCTION	67.85	67.85	0	00:45	0.108	0.108	0.041
19	JUNCTION	67.42	158.56	0	00:36	0.106	0.408	-0.053
20	JUNCTION	68.14	197.24	0	00:36	0.108	0.516	0.018
21	JUNCTION	106.53	213.18	0	00:45	0.168	0.424	0.003
22	JUNCTION	75.72	131.61	0	00:45	0.121	0.267	-0.000
23	JUNCTION	55.89	55.89	0	00:45	0.0864	0.0864	0.078
24	JUNCTION	74.69	88.04	0	00:45	0.114	0.12	-0.012
1	OUTFALL	0.00	885.09	0	00:45	0	1.77	0.000

Fuente: Elaboración propia en el software SWMM