



USO DE PYTHON Y SWMM EN LA GESTION DE AGUAS PLUVIALES EN ZONAS URBANAS

ALEXIS CAMILO PANTOJA PANTOJA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
INGENIERÍA CIVIL

2023-1



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



USO DE PYTHON Y SWMM EN LA GESTION DE AGUAS PLUVIALES EN ZONAS URBANAS

Alexis Camilo Pantoja Pantoja

Tutor: Diego Iván Sánchez Tapiero

**MONOGRAFIA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL**

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

INGENIERÍA CIVIL

2023-1



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios, por permitirme adquirir habilidades y los conocimientos necesarios para afrontar todos los retos que se han cruzado en mi camino.

Agradezco seguidamente a mis ídolos, a mi Padre y a mi Madre, este título es el fruto de los años que dedicaron su vida a darle sentido a mi norte y sur... Por darme los consejos necesarios y la fuerza suficiente para continuar con mi camino, formándome como persona y buen ciudadano, por permitir vivir mi vida con total libertad e igualmente el libre albedrío en mis decisiones personales, a pesar de que ni ustedes ni yo sabemos si en verdad estas han sido las mejores, jamás han apartado su apoyo hacia mí.

A toda mi familia, que desde la distancia estuvo siempre apoyándome y confiando en mis capacidades, y por último agradezco especialmente a Margarita, quien estuvo presente en todo momento importante, por ser fuente de inspiración, su persona permite conocer el verdadero significado de calidad, valentía y determinación.

Alexis Camilo Pantoja Pantoja



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



1. Tabla de contenido

2.	Resumen.....	8
3.	Introducción	9
3.1	Justificación:	10
3.2	¿Qué es un alcantarillado pluvial?	12
3.2.1	¿Qué estructuras componen un alcantarillado pluvial?.....	13
3.3	¿Qué normativa rige el diseño de alcantarillados pluviales en Colombia?	15
3.4	¿Qué es swmm?	16
3.5	Introducción a python y su uso en la gestión de aguas lluvias por medio de alcantarillados pluviales	19
3.5.1	¿Qué es python?.....	19
3.6	¿Qué tipo de algoritmos utiliza python para optimizar el diseño de sistemas de drenaje urbano para la gestión de aguas pluviales?	20
3.7	Desarrollo	21
3.8	Ventajas de asociar python y swmm en simulaciones para la gestión de aguas pluviales por medio de alcantarillados pluviales.....	22
3.9	Análisis de literatura del mejoramiento de la gestión de aguas pluviales implementando python y simulaciones en swmm en alcantarillados.	24
3.10	Problemáticas presentes en los sistemas de drenaje urbano y soluciones propuestas para mejorar la Gestión de aguas pluviales	42
3.11	Errores que se cometen en las simulaciones de drenaje urbano y afectan la gestión de aguas pluviales.....	50
3.12	Soluciones a los errores de simulación	55





3.13	Buenas prácticas de diseño e implementación de Sistemas de drenaje sostenible para mejorar la gestión de aguas pluviales	56
4.	Conclusiones	65
5.	Referencias.....	66





Tabla de ilustraciones

Ilustración 1	impermeabilización del suelo en la ciudad de Tokio.....	11
Ilustración 2	Representación de un alcantarillado pluvial	13
Ilustración 3	Deficiencia del sistema de desagüe pluvial de la ciudad de Valledupar, Colombia.....	18
Ilustración 4	Conexión variable y conexión física	26
Ilustración 5	Esquema de monitoreo del nivel del agua.....	28
Ilustración 6	Cuenca hidrográfica modernizada con tecnología de detección y control	30
Ilustración 7	Representación de cuenca hidrográfica con dispositivos de control.....	32
Ilustración 8	comparación conceptual de un sistema de drenaje.....	36
Ilustración 9	Infiltración del agua hacia los sistemas de drenaje.....	38
Ilustración 10	Esquema conceptual del control de flujo objetivo	41
Ilustración 11	Inundación en la ciudad de Cúcuta	43
Ilustración 12	Pérdida de capacidad de entrada de sumidero	46
Ilustración 13	<i>Inundación producto de taponamiento de sumideros causadas por arrastre de sedimentos.....</i>	<i>47</i>
Ilustración 14	inundación en la ciudad de Alicante	49
Ilustración 15	Taponamiento de sumidero.....	51
Ilustración 16	Bloqueo de la capacidad de entrada de un sumidero	53
Ilustración 17	Cubiertas ecológicas.....	60
Ilustración 18	Comparación entre un pavimento impermeable vs uno permeable	61
Ilustración 19	Jardín de lluvia.....	62



Ilustración 20	Ecocuneta o canal verde.....	63
Ilustración 21	Tanque de Tormenta de Arrofresno ubicado en Madrid	64



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
 Universidad de Pamplona
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



2. Resumen

El uso de Python y el software SWMM en simulaciones de lluvia y entrada de la escorrentía en un alcantarillado pluvial permite obtener resultados más precisos y en menor tiempo, estas simulaciones pueden evaluar el funcionamiento de las estructuras de redes de alcantarillado existentes y estimar conexiones de cuencas hidrográficas, además, Python permite obtener información detallada de los datos de simulaciones realizadas en swmm y en diferentes formatos para realizar informes y evaluaciones.

En este texto se presentan estudios en los que han utilizado Python y SWMM para mejorar el modelado de alcantarillados y diagnosticar problemas como conexiones ilícitas y daños en las tuberías en la administración de aguas pluviales en zonas urbanas; se han desarrollado herramientas de simulación en Python para controlar la cantidad y calidad del agua en los sistemas de alcantarillado. Con el objetivo de reducir inundaciones y mejorar la gestión del agua, se presentan diferentes estudios y propuestas para abordar los desafíos de las inundaciones urbanas causadas por el cambio climático con la implementación de modelos y metodologías que utilizan el acoplamiento de diferentes herramientas, como SWMM y TELEMAT; se discuten estrategias para regular los caudales máximos en los sistemas de alcantarillado, como el uso de tanques de almacenamiento y la optimización en tiempo real; además, se aborda el problema de la infiltración del agua subterránea en las estructuras del sistema de drenaje y se presentan métodos para detectar y cuantificar esta infiltración. Por último, se menciona el uso de dispositivos de control de flujo para gestionar las aguas pluviales y evitar cambios costosos en las infraestructuras de los alcantarillados pluviales.



3. Introducción

El presente trabajo tiene como objeto exponer la trascendencia de utilizar los softwares python y swmm para la gestión de aguas pluviales en zonas urbanas, a fin de conocer los avances tecnológicos en la administración de aguas pluviales en sectores urbanos, se ejecutó una revisión bibliográfica, permitiendo así entender los múltiples beneficios y utilidades que ofrece este software (Python), el segundo software (swmm) acepta scripts para complementar y mejorar algunas de sus funciones, estos son creados a partir del lenguaje de programación python.

La ventaja de usar python en la gestión de aguas pluviales es que permite a los diseñadores automatizar procesos iterativos que normalmente pueden tomar mucho tiempo en ser ejecutados y mostrar los resultados del cálculo, además permite que los errores cometidos en las actividades de simulación y diseño de sistemas de desagües en zonas urbanas disminuyan.

Se describen algunas herramientas creadas en python que sirven para mejorar la gestión de aguas pluviales a través de los sistemas de alcantarillados, especificando la funcionalidad de cada uno de estas y procediendo a realizar una discusión de las ventajas ofrecidas frente a la no utilización de los mismos.

El presente trabajo es de carácter compilativo, pretende incentivar a la comunidad ingenieril a seguir ampliando sus conocimientos en el uso y creación de herramientas tecnológicas con el fin de mejorar la gestión de aguas pluviales.





3.1 Justificación:

El ser humano, con el objetivo de conseguir preservar su bienestar, ha tenido que ingeniárselas para recolectar, transportar, aislar y tratar las distintas aguas residuales producto de la escorrentía producida por las precipitaciones, de acuerdo con (Global Health, n.d.) el agua residual puede contener múltiples parásitos, bacterias y virus culpables de causar un gran número de patologías, provocando dolores intensos e inclusive la muerte, con el fin de controlar la propagación de estas enfermedades, el ser humano se ha visto obligado a gestionar las aguas pluviales, una solución en primera instancia ha sido administrarlas a través de sistemas de desagüe urbano.

(M. Zhao et al., 2023) afirma que el uso de la tierra y cobertura terrestre sin duda alguna, es uno de los principales factores por los cuales se tienen cambios en la escorrentía urbana, el crecimiento de la población y el desarrollo estructural a través de los años (calles, aceras, techos de viviendas, patios, etc), han causado que la mayor parte del suelo del territorio urbano a nivel mundial este mayoritariamente impermeabilizado, (Liang et al., 2021) considera que las inundaciones que ocurren en las ciudades también se debe al aumento de la población que habitan en estas, que a su vez por el desarrollo industrial influye en el cambio climático, las altas concentraciones de concreto en casi todas las edificaciones hace que el agua producto de las precipitaciones no se infiltre en el suelo, y por el contrario esta se escurra y se genere la escorrentía superficial, de acuerdo con (Sytsma et al., 2020) el estado del suelo controla el flujo de escorrentía y su dirección, (Garzón Díaz, 2019) afirma que si la intensidad de precipitación en una zona es mayor que la capacidad de drenaje de los sistemas de alcantarillados pluviales, se formaran encharcamientos superficiales que con el paso del tiempo terminan convirtiéndose en inundaciones.





Tal y como lo explica (Teymouri et al., 2023), las antiguas áreas que solían estar cubiertas por vegetación, ahora se encuentran tapadas por distintas infraestructuras como edificios, estacionamientos, calles y aceras que causan una escorrentía fluida en lugar de infiltrarse en el suelo, (Dawson et al., 2008) afirma que aquellas zonas con cuencas altamente urbanizadas tendrán una mayor probabilidad de inundación en época de lluvias, además (Bonells, n.d.) comenta que la impermeabilización del suelo causa daños irreversibles en el suelo y atenta gravemente contra la biodiversidad, en la ilustración 1 se puede observar un claro ejemplo de los cambios bruscos que ha sufrido el suelo debido al desarrollo e incremento de la población mundial.

Ilustración 1

impermeabilización del suelo en la ciudad de Tokio



Nota. *Las grandes ciudades del mundo antes y ahora* (imagen), por La voz del muro, 2016, (<https://lavozdelmuro.net/las-grandes-ciudades-del-mundo-antes-y-ahora/>)



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Actualmente en muchas ciudades del mundo, la administración de aguas pluviales en sectores urbanos está compuesta por alcantarillados pluviales, a continuación, se procede a dar una introducción acerca de estas estructuras y se mencionan algunos aspectos importantes que se deben tener en cuenta para su diseño, al tener implementar el uso de software para mejorar la gestión de aguas pluviales, también es importante cumplir con ciertos parámetros normativos, estas disposiciones permiten preservar las estructuras que se vayan a construir.

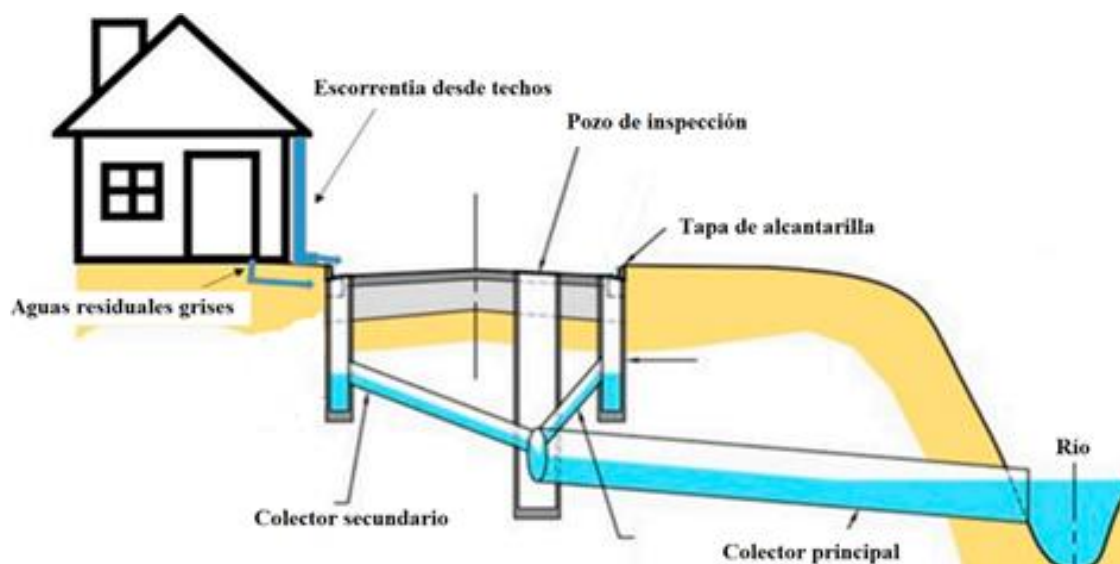
3.2 ¿Qué es un alcantarillado pluvial?

Los alcantarillados pluviales son sistemas de drenaje conformados por componentes de conducción, captación y estructuras complementarias, estos sistemas cumplen la función principal de recolectar el agua de lluvia que cae en un área determinada y luego se convierte en escorrentía; las estructuras encargadas de su recolección son los sumideros, los cuales están conectados a un colector que se encarga de transportarlas hasta un punto de descarga, ya sea un cuerpo hídrico o planta de tratamiento, la importancia que tienen estas estructuras de acuerdo con (Teymouri et al., 2023) es que el agua de escorrentía contiene muchos materiales compuestos por químicos orgánicos e inorgánicos que si no son tratados con su respectiva importancia pueden causar una contaminación muy importante en cuerpos hídricos naturales, de aquí la importancia de tener una buena gestión de aguas pluviales, en la ilustración se encuentra la representación de un alcantarillado pluvial.



Ilustración 2

Representación de un alcantarillado pluvial



Nota. Alcantarillado pluvial (imagen), por guías verdes, n.d, (<https://www.guiasverdes.org/guias/identificar-el-sistema-de-escorrentia-y-sus-caracteristicas-en-el-area-de-estudio/>)

3.2.1 ¿Qué estructuras componen un alcantarillado pluvial?

De acuerdo con (SANTODOMINGO ZULETA, n.d.) las estructuras de las redes de drenaje urbano pueden clasificarse de acuerdo al propósito con el que se encarga cada una de estas, a continuación, una breve descripción de las mismas:

- Estructuras de captación: Como su nombre describe, son estructuras encargadas de captar el agua residual producto de la escorrentía, se dividen en:
 - a. Sumideros



- b. Canaletas y bajantes
- Estructuras de conducción: Son las encargadas de transportar el agua residual desde las estructuras de recolección hasta un punto de descarga.
 - a. Tuberías
 - b. Canales
- Estructuras de conexión e inspección: Comúnmente llamados nodos, sirven para interconectar diferentes caudales provenientes de las tuberías y formar uno solo, además sirven para disipar la energía con la que llega el agua y conforman puntos de acceso a la red para su respectiva inspección y mantenimiento, se dividen en:
 - a. Pozos de inspección
 - b. Cámara de caída
- Estructuras de regulación: Son elementos que se utilizan para dar control el flujo de agua, sirven para que no se produzcan inundaciones y el caudal del agua no genere peligro a la comunidad.
 - a. Sifones invertidos
 - b. aliviaderos
 - c. Estructuras de bombeo
 - d. Estructuras de disipación de energía



3.3 ¿Qué normativa rige el diseño de alcantarillados pluviales en Colombia?

la Resolución 0330 de 2017 es la normativa vigente para el año 2023 en el territorio colombiano, es una norma técnica que adopta el RAS y suprime las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009.

Los artículos que tienen mayor importancia para el diseño de las estructuras de alcantarillados son los siguientes:

- Artículo 150: Las disposiciones que se dictan en este artículo, regulan la velocidad máxima real en un colector limitándola a máximo 5m/s, permite velocidades superiores cuando el caudal sea superior a 500l/s o cuando la pendiente sea superior al 30%, la normativa recomienda que se debe seleccionar revestimientos internos para permitir la resistencia a la abrasión, en ningún caso la velocidad puede superar los 10m/s.
- Artículo 151: Establece la relación máxima de la profundidad del fluido y el diámetro de la tubería, este valor puede llegar a un máximo del 93% del diámetro interno real de este.
- Artículo 152: Dicta las disposiciones para el trazado y dimensionamiento de un canal, los cuales deben transportar únicamente aguas de escorrentía proveniente de las lluvias, los requisitos establecidos son:
 - a. funcionar a gravedad evitando el flujo crítico
 - b. Canal con sección transversal cerrada la profundidad del fluido debe ser menor al 90% de la altura del conducto.



- c. Para el caudal de diseño tiene que tenerse en cuenta los aportes tributarios.
- d. La velocidad máxima para canales en concreto no debe superar los 5m/s, si se opta por otro material, se debe evaluar la posibilidad de erosión.
- e. La pendiente mínima tiene que evitar que la velocidad del fluido no sea menor a 0.75m/s.
- f. Se debe prever el borde libre y la sobreelevación del flujo causadas por curvas horizontales.
- g. En los canales abiertos se deben tener en cuenta bermas, estructuras de amortiguación y zonas para realizar mantenimiento.

A continuación, se da una presentación de los softwares Swmm y python, sobre estos se trata la investigación de como ayudan a una mejor gestión de las aguas pluviales.

3.4 ¿Qué es swmm?

Swmm ó storm water managment model por sus siglas en inglés y modelo de gestión de aguas pluviales en español, es una herramienta desarrollada por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (Epa) en el año 1971, este software fue creado a partir de modelos matemáticos, de acuerdo con (Álvarez et al., n.d.) swmm permite modelar los procesos que ocurren cuando el agua pluvial cae en un área y se escurre a través de esa superficie, este programa es tan importante para el desarrollo de cualquier ciudad que necesite mejorar la gestión de aguas pluviales, ya que permite evaluar comportamiento e impacto que el agua de lluvia puede generar en los sistemas hidráulico de drenaje, permitiendo diseñar



estrategias de control para mitigar estos efectos, prevenir inundaciones a partir de la optimización de las redes, encontrar concentración de contaminantes entre otras herramientas.

Para poder hablar de como python y swmm ayudan a mejorar la administración de aguas pluviales en áreas urbanas, es importante mencionar la realidad en la que se encuentran los sistemas de drenaje urbano en muchas ciudades, ya sea en Colombia u otros lugares del mundo.

En Colombia, muchas de las zonas urbanas no cuentan con sistemas de drenaje pluvial o sus estructuras tienen un desempeño deficientes lo que no permite tener una buena gestión de las aguas pluviales, ya sea por falta de mantenimiento o desperfectos en las estructuras, de acuerdo con (Xu et al., 2021) el caudal de infiltración de las aguas subterráneas puede ocupar un volumen considerable, disminuyendo la capacidad de drenaje para los que fueron diseñados los alcantarillados pluviales, de acuerdo con (Wang et al., 2021) omitir el control del vertimiento de aguas subterráneas en los sistemas de alcantarillados, representa una amenaza en contra de los ecosistemas y medio ambiente, la acumulación de químicos y demás contaminantes combinadas con sedimentos, generan problemas de cabida en las tuberías del sistema de desagüe urbano. Con base a códigos realizados en python se puede facilitar el proceso de diseño, la rehabilitación de estructuras dañadas y la verificación del estado en que se encuentra el agua en los sistemas de desagüe. A través de simulaciones en swmm, con aplicativos en python como el paquete pyswmm, se puede establecer tipología de la red, dimensionamiento de tuberías, o verificar el estado en que se encuentran las redes de alcantarillado y ubicar las estructuras dañadas, (Lazo Sandoval, 2014) sostiene que a través de estas herramientas y ejecutando un monitoreo constante de las redes de alcantarillado, se pueden dar respuestas



tempranas y ejecutar procedimientos más rápido con el fin de evitar inundaciones y daños en las estructuras del sistema de drenaje.

Ilustración 3

Deficiencia del sistema de desagüe pluvial en Valledupar, Colombia



Nota. Alcantarillado pluvial deficiente (fotografía), por El Pilon,2022, (<https://elpilon.com.co/pasa-alcantarillado-valledupar/>)



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
 Universidad de Pamplona
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



3.5 Introducción a python y su uso en la gestión de aguas lluvias por medio de alcantarillados pluviales

Dada la versatilidad que tiene python respecto a otros lenguajes de programación, se decide trabajar con este, para dejar camino abierto y que otros autores puedan seguir aportando sus ideas para el mejoramiento en la administración de aguas pluviales y el desarrollo de las comunidades.

3.5.1 ¿Qué es python?

Python es un software de código abierto de propósito general, lo cual permite que se pueda utilizar para resolver problemas o realizar todo tipo de aplicaciones gratuitamente, es un lenguaje de programación interpretado y multiparadigma, admite muchos estilos de programación, permite la orientación a objetos, programación imperativa, característica importante de dar instrucciones de cómo hacer algo dependiendo de los comando que se ejecuten, y en menor proporción la programación funcional la cual determina la función a realizar, de acuerdo con (Holguín et al., n.d.) los lenguajes de programación son la base fundamental para el desarrollo de todo tipo de programas y aplicaciones, la ventaja de este software es que puede ser utilizado en muchas áreas, educación, economía, industria, investigación, entre otros, una de las fortalezas de python de acuerdo con (Van Thieu & Mirjalili, 2023) python posee una librería de las más completas en la actualidad, se puede comparar incluso con java o .NET, tanto así que puede satisfacer la mayoría de necesidades de cualquier programador, a pesar de ser un lenguaje interpretado es bastante rápido ya que su librería y funciones se basan en el lenguaje c, permitiendo optimizar su proceso de interpretación.





3.6 ¿Qué tipo de algoritmos utiliza python para optimizar el diseño de sistemas de drenaje urbano para la gestión de aguas pluviales?

Python utiliza muchos tipos de algoritmos (instrucciones que se utilizan para dar solución a un determinado problema, tienen un orden lógico) que se utilizan en las simulaciones realizadas en swmm en la gestión de aguas lluvias por medio de aguas pluviales, a continuación, se mencionan los más importantes:

- a. Algoritmos heurísticos: Son algoritmos encaminados a la resolución de problemas que toman demasiado tiempo en ser resueltos, los cuales pueden o no tener una solución exacta debido a que representan un alto nivel de dificultad. Estos algoritmos exploran soluciones aproximadas al azar utilizando procesos de búsqueda y optimización de funciones con el fin de dar solución a los problemas en un lapso de tiempo, pero no quiere decir que siempre llegue a la solución, es posible que en algunos casos sea mejor utilizar métodos ya establecidos, como por ejemplo encontrar las raíces de una función cuadrática, se utilizan principalmente en la inteligencia artificial.
- b. Algoritmos evolutivos: Estos se basan en la teoría del cambio o mejor conocida como evolución natural para resolver problemas de optimización donde los espacios de búsqueda son grandes, se utilizan principalmente para optimizar las soluciones para redes de tuberías.





- c. Algoritmos de optimización inversa: Son algoritmos que utilizan la metodología de prueba y error, buscan parámetros de entrada que satisfagan una respuesta de valores deseados.
- d. Algoritmo de Monte Carlo: Esta metodología consiste en buscar aproximaciones a las expresiones matemáticas que pueden ser muy complicados de resolver y dar valores exactos inclusive para una máquina.

3.7 Desarrollo

Existen muchos sistemas de drenaje actualmente en el mundo, pero por cuestiones prioritarias es importante centrarse en la actualidad de los países no desarrollados y que requieren soluciones muy próximas como ocurre en Colombia, así pues, es importante hablar de los sistemas de desagüe urbano más comunes, en este caso es válido centrarse en la gestión de aguas pluviales a través de los sistemas de alcantarillados pluviales, en este trabajo se ha recopilado información de proyectos que han tenido éxito en sus lugares de ejecución y que de acuerdo a sus respectivos autores quienes afirman que se puede interpolar sus proyectos en otros lugares, con este trabajo se pretende aportar ideas a los ingenieros pioneros encaminados a mejorar la gestión de aguas pluviales en zonas urbanas.

Gracias al avance tecnológico, en la actualidad existen distintas herramientas basadas en software que se pueden manejar por separado o en conjunto para facilitar los procesos de simulación, modelación y diseño de redes drenaje urbano, muchos de estos softwares se pueden complementar con el uso de códigos sintetizados en el lenguaje de programación python, estos son de gran utilidad para optimizar los sistemas de drenaje urbano como lo son los alcantarillados pluviales, además que se puede realizar un control del estado del agua, con códigos creados en python se puede acceder a los datos de una simulación de lluvia realizada



en swmm para manipular características de las estructuras, cambiar datos de entrada, variar algunos parámetros específicos para calibrar los modelos con la finalidad de que las simulaciones sean más precisas y lo más próximas a la realidad.

Para realizar un control de la escorrentía urbana, evitar inundaciones superficiales y controlar el estado de la calidad del agua, actualmente se ha optado por realizar simulaciones de lluvia con distintos periodos de retorno con el fin de poder modelar el comportamiento del agua en los sistemas de alcantarillado pluvial, obtener una aproximación de su funcionamiento y dar un ajuste de seguridad a los diseños. Para mitigar las consecuencias de estos eventos naturales (Liang et al., 2022) proponen optimizar los alcantarillados pluviales con la implementación de controles en tiempo real (RTC), (Wang et al., 2021) sostiene que estas estrategias permiten optimizar y controlar la cantidad de flujo que transportan las tuberías de la red evitando saturaciones en el sistema que resulten en inundaciones urbanas. Existen muchos softwares, algunos incluyen la ventaja de poder trabajar en conjunto con programas creados en distintos lenguajes de programación, una de las combinaciones más reconocidas es swmm y python, la gran ventaja de estos 2 softwares es que el primero es de uso libre y el segundo de código abierto, permitiendo así utilizar todas las funciones sin tener mayores complicaciones.

3.8 Ventajas de asociar python y swmm en simulaciones para la gestión de aguas pluviales por medio de alcantarillados pluviales

En general existen muchas ventajas cuando se asocia python y swmm, con los scripts (parte de un código que se utiliza para controlar funciones de un programa o aplicación determinada) creados en el lenguaje de programación de python se puede controlar la mayoría



de funciones que ofrece swmm de una forma mucho más fácil tanto para realizarlas y entenderlas, todo depende de la estructura en que el autor programe los códigos, ya que existen muchas formas de programar y obtener los mismos resultados acordes a la necesidad que se quiera satisfacer en los procesos.

Específicamente Las ventajas de utilizar python para controlar las funciones de swmm en las simulaciones de precipitaciones para la gestión de aguas pluviales son:

- a. Ejecución más rápida de los procesos de simulación para poder conocer el comportamiento del agua, accediendo a la posibilidad de variar los intervalos de tiempo de cada simulación y obtener los resultados en un menor tiempo posible.
- b. Evaluación del funcionamiento y desempeño de las estructuras de redes de alcantarillado ya construidas, esto debido a que muchos de los sistemas de desagüe urbano en Colombia no tienen la capacidad para evacuar grandes volúmenes de agua de escorrentía, siendo esta una función muy importante, según (Cubides & Santos, 2018) la impermeabilización del suelo ha hecho que se altere la hidrología de las cuencas produciendo una mayor escorrentía aumentando el caudal que las tuberías tienen que transportar.
- c. Con python y swmm, se pueden crear aplicativos para realizar simulaciones de precipitación y comportamientos del flujo de agua más próximos a la realidad, de acuerdo con (Leitão et al., 2017) en muchas simulaciones de diseños de alcantarillados no se tiene en cuenta las obstrucciones en los sumideros, afectando el desempeño de las estructuras del alcantarillado.



- d. Se puede controlar el área de las subcuencas aportantes de flujo a cada sumidero, siendo estas más exactas cuando se realizan con un script de python que en swmm.
- e. Para informes ingenieriles y complementos laborales, con python se puede obtener demasiada información y material en distintos formatos, como características de las estructuras del alcantarillado, información general del proyecto (ubicación en coordenadas de las estructuras), perfiles de tramos de alcantarillados, niveles de flujo, entre otros, siendo este material útil para métodos constructivos, informes, evaluaciones de imprevistos entre otros; este material puede ser en formato: Pdf, png, dwg.
- f. Gracias a los algoritmos evolutivos, se pueden realizar estimaciones de las conexiones de cuencas hidrográficas aportantes de caudal a los arroyos de agua que serán evacuados por los sistemas de alcantarillados.
- g. Las modificaciones del módulo de calidad del agua permiten modernizar los sistemas de alcantarillados, disminuir la contaminación del agua y ahorrar dinero en estos procedimientos que normalmente tienen un alto costo.
- h. Creación de bibliotecas que permiten dar soluciones a problemas hidráulicos simplificando el proceso de cálculo sin dejar de tener en cuenta los parámetros que intervienen en estos.

3.9 Análisis de literatura del mejoramiento de la gestión de aguas pluviales implementando python y simulaciones en swmm en alcantarillados.

A continuación, se procede a realizar una revisión de trabajos realizados acerca de la implementación de python y swmm en simulaciones de lluvia y la optimización de los sistemas



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



de desagüe, de acuerdo con los autores estas metodologías implementadas pueden ser aplicadas en la mayoría de sistemas de alcantarillados en el mundo con el fin de mejorar el modelado y gestión de aguas lluvias.

Cabe resaltar que Pyswmm es un paquete de software de python que permite acceder a los datos de simulación y funciones de swmm, sin este paquete de software no fuera posible que los dos programas puedan trabajar en conjunto, esto quiere decir que si alguien llegara a tener acceso a los aplicativos que se presentarán a continuación, se tendrá que importar pyswmm en la interfaz de programación python como si fuera una librería común del software, la forma de hacerlo es simple, simplemente escribir la siguiente línea de código:

```
Import Pyswmm
```

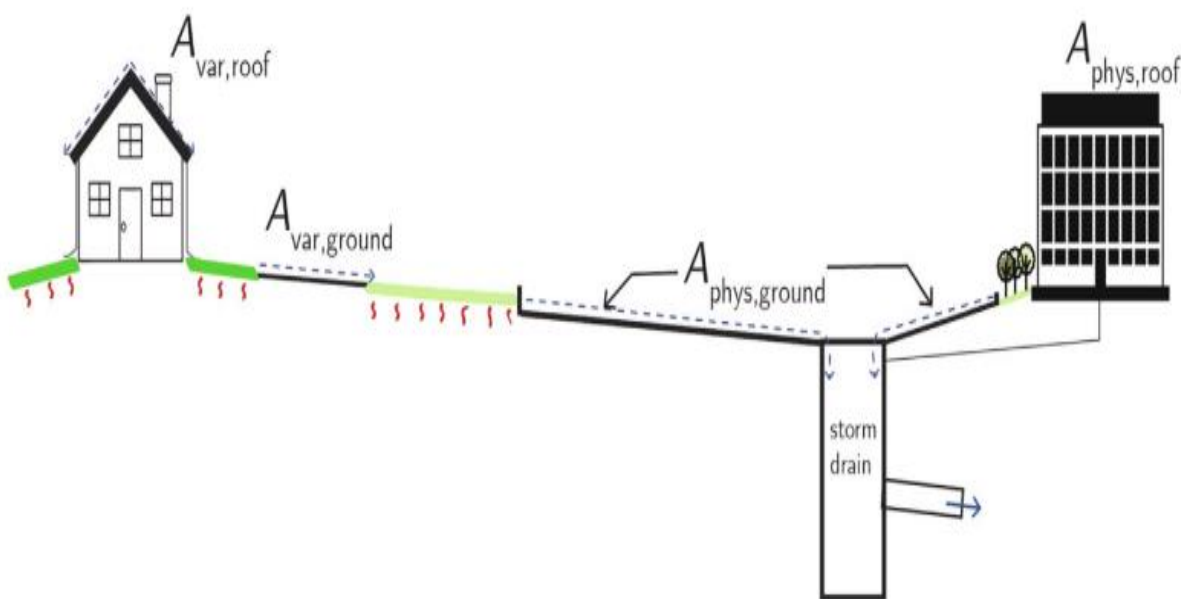
El trabajo realizado por (Sytsma et al., 2020) trata de como las áreas impermeables interconectadas son las que aportan directamente en el crecimiento de caudal en arroyos aportantes a las redes de alcantarillados; según comentan los métodos tradicionales usados para estos procedimientos y la cuantificación de las áreas impermeables requieren de suposiciones importantes como los cambios de pendiente, condiciones del suelo, y rutas de flujo. (Sytsma et al., 2020) proponen un nuevo método y modelo conceptual para poder identificarlas, considerando el efecto del relieve y la variabilidad de las tormentas. La ejecución del método consiste en separar las superficies impermeables en dos categorías, las que están conectadas de manera directa (físicamente) y las que tienen conexión variable, donde la parte impermeable del suelo drena a la permeable, véase la ilustración. Este método fue desarrollado utilizando la librería pyswmm, interfaz de python para swmm; el trabajo consiste en entrenar un



árbol de decisión (regresión) para que los resultados sean más confiables en las predicciones de infiltración de la escorrentía o conectividad de estas, en las simulaciones se integran distintos parámetros de suelo, diferencias en gradientes de inclinación, variación de geometría; para complementar su metodología, con ayuda de ArcGIS crearon una herramienta que les permite delimitar subcuencas para extraer las categorías de la superficie, el resultado de este trabajo, muestra que el suelo húmedo (antecedente) controlan la conectividad de escorrentía en suelos impermeables, y la dirección del flujo en áreas permeables desconectadas controla la conexión de escorrentía en suelos con alta permeabilidad.

Ilustración 4

Conexión variable y conexión física



Nota. Conexión de cuencas (imagen), tomado de (Sytsma et al., 2020).



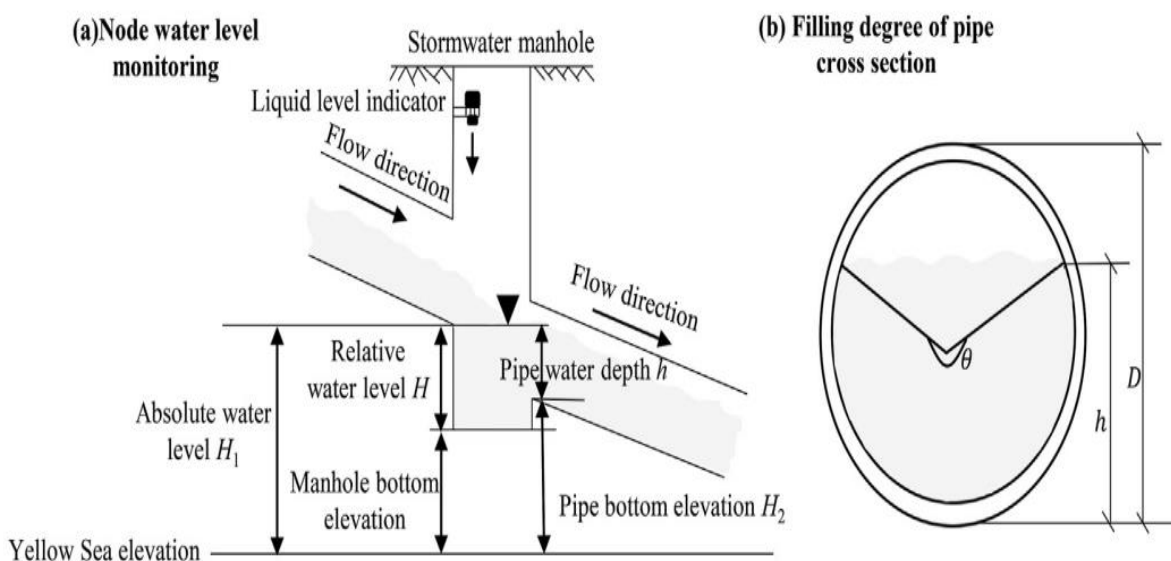
Este trabajo, como se mencionó anteriormente, permite identificar la interconexión de cuencas, un factor muy importante en la gestión de aguas pluviales, ya que si 2 cuencas o más están interconectadas, el aporte de caudal que se capta en un sumidero será mayor y afectará directamente la hidráulica de todo el sistema, pudiendo ocasionar saturación de flujo y desbordamientos hacia fuera de los sumideros, ya que los conductos no serán capaces de transportar toda el agua lluvia que llega hacia un punto en específico.

Los autores (Xu et al., 2021) realizaron un estudio el cual consiste en crear e implementar un modelo para diagnosticar y ubicar de manera precisa las conexiones ilícitas y daños en las tuberías de los alcantarillados, siendo estos problemas muy comunes en los sistemas de desagüe pluvial; Este modelo se implementó en la zona de descarga de Xiao Hecha del río Cihu en Ma'anshan, provincia de Anhui, China, utilizando un algoritmo de optimización inversa. Para calcular el caudal producto de las conexiones ilícitas y de la infiltración de aguas subterráneas implementaron un modelo de balance de masa química (CMB por sus siglas en inglés) basado estadísticamente en el algoritmo de monte Carlo, a través de un paquete de python (pyswmm) para SWMM. El CMB se ingresó como dato de entrada (restricción) en cada nodo de las tuberías del sistema de desagüe, examinando el nivel del agua que transportan los conductos hacia cada nodo, en la ilustración se representa el procedimiento de monitoreo, validaron la exactitud del modelo, corroborando los resultados haciendo uso del error cuadrático medio, implementando la calibración entre el flujo medido y el flujo simulado.



Ilustración 5

Esquema de monitoreo del nivel del agua



Nota. Monitoreo niveles de agua en sistemas de drenaje pluvial. Tomado de (Xu et al., 2021).

Este estudio aborda otro parámetro muy importante para la buena gestión de aguas pluviales, las conexiones ilícitas e infiltración de flujo de agua interfieren en la operatividad de los sistemas de alcantarillado, (Espinosa Gutiérrez et al., 2015) afirma que las consecuencias son económicas, técnicas, y ambientales, ya que el volumen que se genera ocasiona el desbordamiento de las tuberías, además que se depositan materiales contaminantes en una mayor cantidad de agua que también puede salir a la superficie terrestre, (Espinosa Gutiérrez et al., 2015) también concluye en su estudio, que entre mayor sea la edad de las tuberías que componen el sistema de drenaje, mayor será en caudal de infiltración y los contaminantes



transportados, por eso es de vital importancia la identificación de estas anomalías en el sistema para proceder a una reparación de sus estructuras para que no se genere problemas en la gestión del agua pluvial en zonas urbanas.

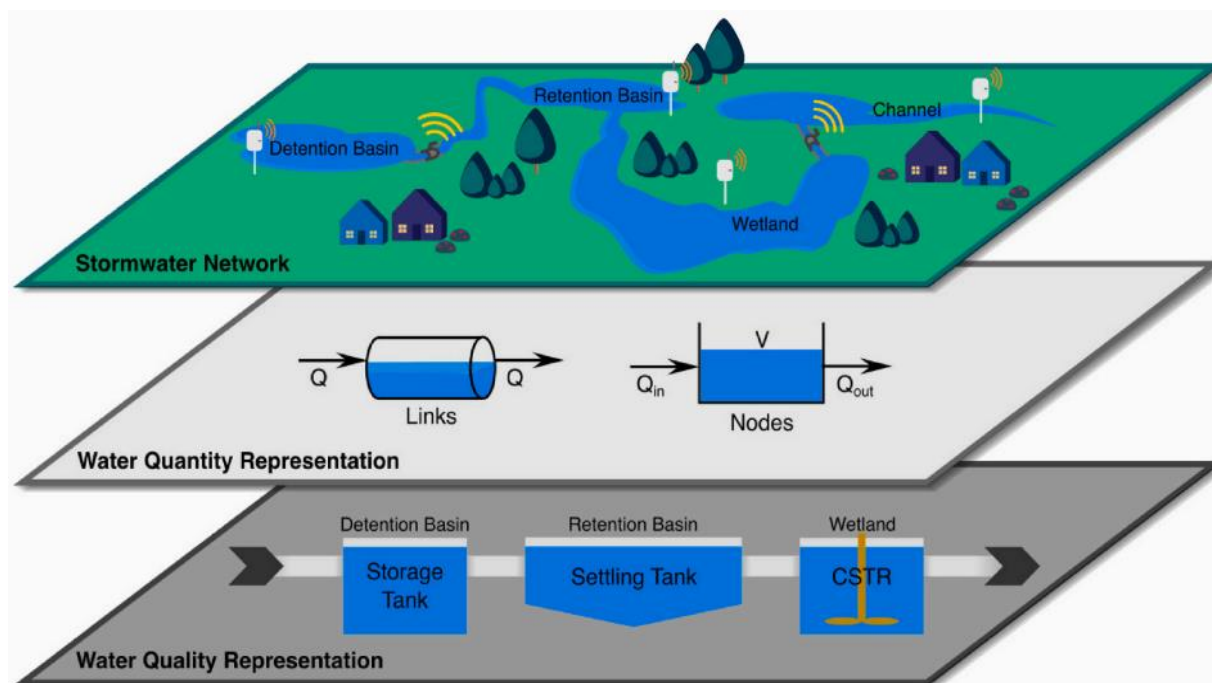
Una buena gestión de aguas pluviales también consiste en poder identificar los contaminantes arrastrados por el agua; Los autores (Mason et al., 2021) crearon un nuevo paquete de python que permite interactuar con el modelado de la calidad del agua dentro de los alcantarillados llamado STORMREACTOR, este trabajo fue posible gracias a que swmm tiene un buen solucionador hidráulico con el que se puede modelar el flujo y el enrutamiento de los contaminantes de forma más precisa, permitiendo identificar zonas donde se producen problemas de calidad del agua; dado que swmm no puede simular el tratamiento y generación de contaminantes (suspensión de sedimentos o erosión) dentro de conductos o canales, debido a que el respectivo tratamiento no se puede activar o desactivar por los aspectos influyentes (condiciones de sitio); por lo que es indispensable que el tratamiento se ejecute durante todo el tiempo en que dure la simulación.

Este trabajo representa un avance muy importante si se implementa para reducir la contaminación de las aguas pluviales, ya que al localizar las zonas donde existe infiltración de aguas contaminadas que pueden llegar hasta los depósitos finales de descarga; permitirá su pronta rehabilitación estructural, ya sea que los problemas se sitúen en las tuberías o en los sumideros, además que el importe de dinero utilizado en el mantenimiento o reemplazo de los sistemas de alcantarillado se puede reducir, ya que no es necesario realizar mediciones manuales o utilización de equipos costosos, véase la ilustración 6.



Ilustración 6

Cuenca hidrográfica modernizada con tecnología de detección y control



Nota. Dispositivos de control en cuenca hidrográfica moderna. Tomado de (Mason et al., 2021).

Para permitir la interacción entre el motor C de swmm (Mason et al., 2021) se inclinaron por utilizar la librería pyswmm, cambiando el código de fuente para acceder a los estados de la calidad del agua y permitir que estos sean modificados, se agregaron captadores y setters para acceder a los datos de la simulación en tiempo real y cambiar variables de simulación; (Mason et al., 2021) aseguran que stormreactor ofrece varios procesos enfocados en la generación y tratamiento de contaminantes, además permite a los usuarios implementar procesos adicionales por su cuenta, para demostrar una de las tantas metodologías de modelamiento de calidad del agua que ofrece el software, simulamos nitratos y sólidos en suspensión en una red de drenaje



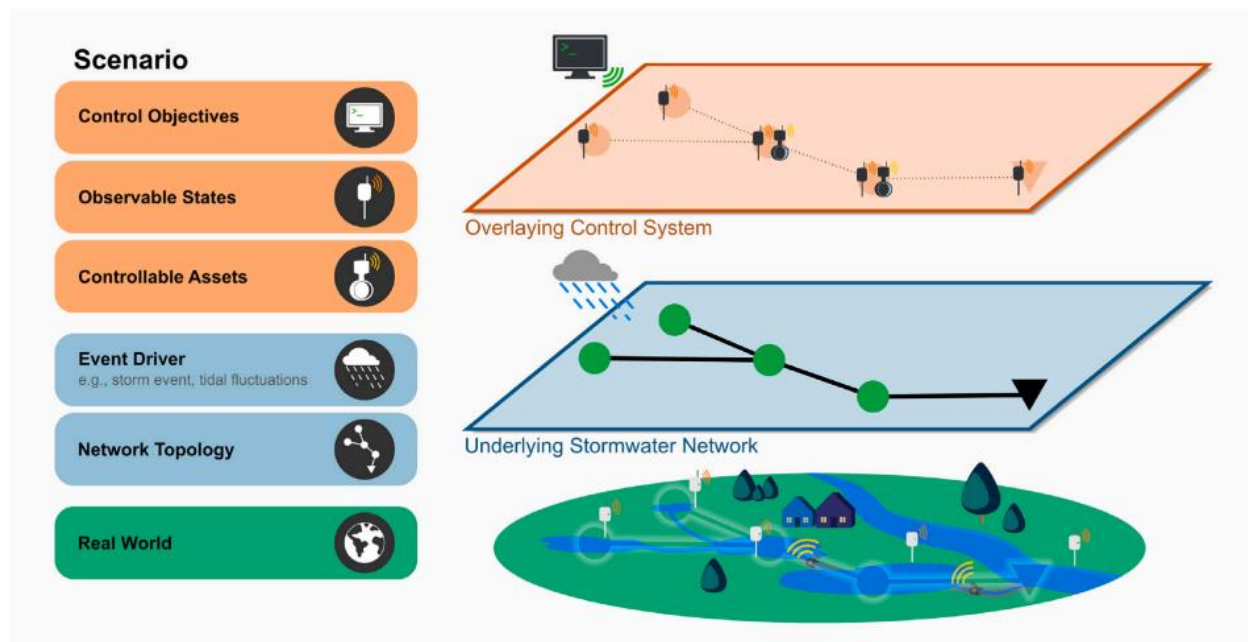
pluvial real, los resultados de esta simulación muestran que un activo controlado, puede lograr la misma descontaminación del agua que un activo no controlado.

Los investigadores (Rimer et al., 2023) crearon un entorno de simulación llamado “pystorm” desarrollado en el lenguaje de python, este sirve para la evaluación de algoritmos de control de las aguas pluviales, ofrece múltiples escenarios del comportamiento de la lluvia en cuencas urbanas reales, lo crearon para facilitar la examinación de la cantidad de lluvia que cae en una determinada área y la implementación de estrategias de control para manejar la afluencia de agua que entra en el sistema de alcantarillado y así controlar la calidad de la misma o subyugar el impacto que pueda ocasionar en los sistemas de alcantarillado, véase ilustración 7, el desarrollo permite la evolución de los actuales y futuros diseños de alcantarillados, esta herramienta tiene como objetivo reducir las inundaciones urbanas y mejorar la gestión de la calidad del agua, siendo esta autónoma en el control de los componentes hidráulicos correspondientes a la cuenca, su implementación es una alternativa para hacer a un lado las opciones de construir nuevas estructuras para el sistema, estas al estar constituidas en mayor porcentaje por hormigón y acero, la construcción de los mismos representan costos elevados.



Ilustración 7

Representación de cuenca hidrográfica con dispositivos de control



Nota. Dispositivos de control en cuenca hidrográfica moderna. Tomado de (Rimer et al., 2023).

(Rimer et al., 2023) afirman que las redes de agua simuladas de forma ideal son una herramienta importante para crear novedosas herramientas de control, por esta razón es necesario que estas sean evaluadas aplicándolas a sistemas de la vida real, es por esto que los desarrolladores de pystorm crearon este paquete de código abierto con un repositorio de situaciones reales de control inteligente para flujos de aguas pluviales en tiempo real, inicialmente pystorm proporciona 7 escenarios extraídos de sistemas de drenaje pluvial inteligentes en el viejo y nuevo continente, estos engloban una gran variedad de sistemas de drenaje que satisfacen las necesidades de su correspondiente cuenca hidrográfica con



herramientas de control, estos sistemas inteligentes son intuitivos y detectan parámetros después de recibir señales de sensores, se aplica por ejemplo para determinar cómo se mueve el agua alrededor del sistema de recolección y así poder ejecutar acciones tales como la operación de válvulas, bombas u otras partes del sistema de drenaje, a través de la interfaz de programación se pueden acoplar otros softwares de programación (MATLAB, JULIA) y simuladores de aguas pluviales, aspirando a que el entorno de escenarios crezca, permiten que usuarios contribuyan adicionando trabajos propios o modificando los existentes.

Evitar las inundaciones urbanas también hace parte de una buena administración de las aguas pluviales; con el fin de abordar los desafíos que estas representan y su frecuencia debido a la no estacionariedad de las condiciones climáticas, (W. Yang et al., 2023) proponen un nuevo modelo (SWTM) acoplando SWMM y TELEMAC; se pretende mejorar las simulaciones en las áreas donde se produce inundaciones, las cuales dependen de su profundidad, duración, y la posible unión del flujo y el efecto de reflujo ocasionados cuando suceden estas situaciones. El modelo consta de 3 partes importantes en su organización, primero se establece el modelo de red de tuberías unidimensional, luego el modelo de inundación bidimensional y por último la construcción de SWTM. El funcionamiento del modelo trabaja bajo la implementación del algoritmo D8, usado para dividir una cuenca de estudio en cuencas más pequeñas simulando la escorrentía de la lluvia, el algoritmo se ve favorecido por una interpolación lineal del DEM de la zona, aplicando un promedio de la ruta para el cálculo del ancho de la escorrentía y pendiente de esta. Para los procesos de simulaciones de inundación el modelo bidimensional se sirve de la información del desbordamiento y reflujo en los pozos de inspección. Para verificar la calidad





de simulación, los autores ejecutaron una puesta en marcha del modelo para predecir como se inundaría el área de Fangzhuang, Beijing, los resultados muestran que SWTM puede simular los rangos de inundaciones y sus variaciones, tanto en área, profundidad y tiempo, estos resultados fueron comparados con modelos tradicionales, destacando que el propuesto tuvo mayor favorabilidad en precisión.

Uno de los principales métodos para regular los caudales máximos en los sistemas de alcantarillados, es el uso de tanques de almacenamiento, esta opción es una alternativa a optar ante carencia o restricción económica, (Liang et al., 2021) mencionan que el uso de estos sistemas de almacenamiento tienen volúmenes y ubicaciones ya establecidos y la única forma en que logran optimizarlos es mediante las metodologías de control en tiempo real, pero en la mayoría de casos es ignorada la posibilidad de poder mejorar y optimizar la estructura de almacenamiento.

Los autores, (Liang et al., 2021) proponen una estrategia para poder efectuar estas optimizaciones, se usó python para vincular el Paquete DEAP (algoritmos evolutivos) usados en la optimización y Pyswmm para acceder a los datos de las simulaciones hechas en swmm, la metodología consiste en ejecutar dos pasos con objeto de minimizar caudales picos en las tuberías de los sistemas de drenaje urbano ubicadas en áreas de especial atención y reducir el volumen total del almacenamiento del sistema de desagüe, el primer paso consiste en la optimización y diseño de los almacenamientos a partir de algoritmos evolutivos y metaheurísticas tomando como variables de entrada la ubicación y volúmenes de los mismos,



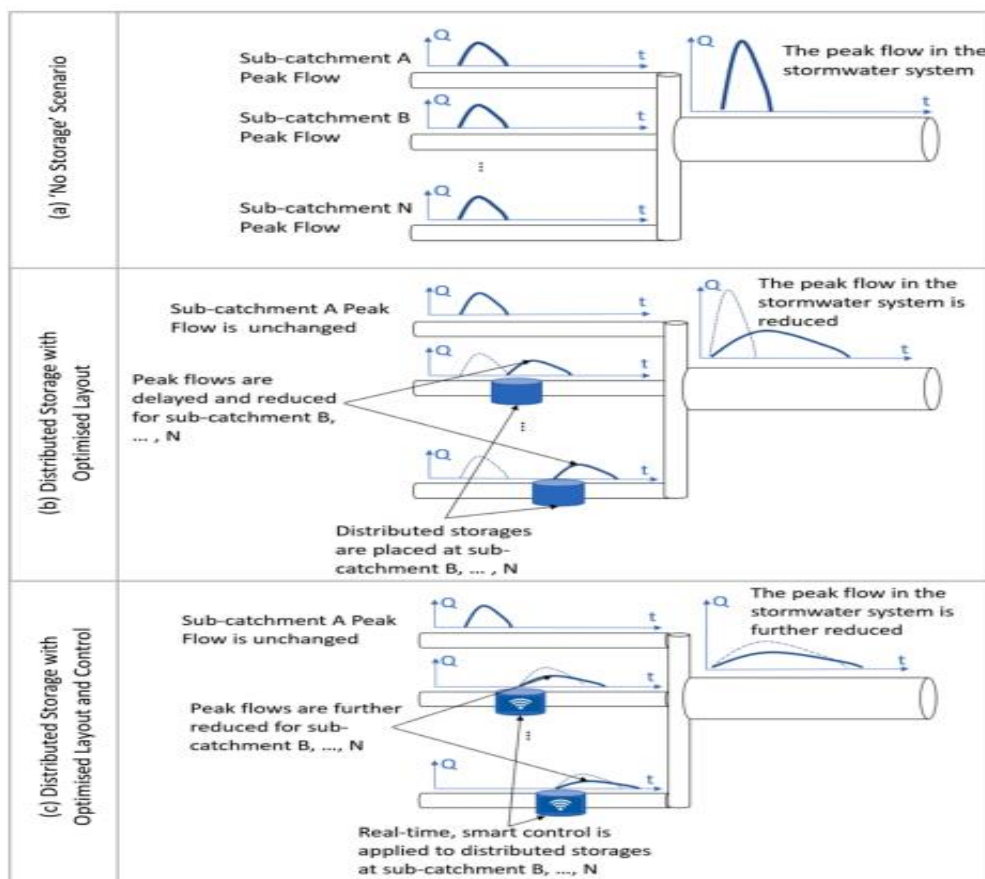


el segundo paso consiste en optimizar el control en tiempo real RTC en las salidas de los almacenamientos controlando el porcentaje de apertura del orificio, como resultado de esta estrategia se obtiene una curva de compensación entre el volumen de fluido que almacena el tanque y los caudales máximos a transportar por el sistema de tuberías.

En la ilustración 8 se puede observar la comparación de 3 escenarios (realizados por el autor) en el que se puede encontrar un sistema de drenaje(conceptual): en la situación a) es un sistema convencional sin tanques de almacenamiento, donde se presentan caudales pico, en la situación b) es un sistema de alcantarillado que implementa el uso de tanques de almacenamiento, donde se observa que aunque posee estos tanques y reduce un poco los caudales pico que transportan las tuberías, los resultados no son tan significativos, y en cambio en el escenario c), donde se representa el trabajo realizado por (Liang et al., 2021), se puede ver como el sistema de alcantarillado inteligente ayuda a gestionar los caudales pico y reducirlos en una gran magnitud.

Ilustración 8

comparación conceptual de un sistema de drenaje



Nota. Comparación de sistemas de drenaje con (b,c) y sin (a) tanques de almacenamiento. Tomado de , (Liang et al., 2021)

Una de las muchas razones por las que el funcionamiento de las redes de los sistemas de alcantarillados pluviales se ven afectados, se debe a la infiltración del agua subterránea en las distintas estructuras del sistema de drenaje urbano, ocasionando el incremento o en algunos



casos el exceso de caudal que las tuberías pueden transportar, el aporte de caudal de estas aguas en el sistema de alcantarillado pueden representar un alto peligro; si no se controlan es posible que se causen contraflujos en el sistema y lo más probable es que terminen en procesos de inundación, una solución a este problema la proponen (Z. Zhao et al., 2020), quienes desarrollaron una metodología con el propósito de detectar las zonas permeables de un sistema de drenaje por donde ingresa el fluido subterráneo (afuas del subsuelo) y la cuantificación de la misma, realizaron un estudio utilizando el modelo en una red en la ciudad de Chaohu, China; la metodología implementada consistió en añadir borato (trazador químico) al agua en el acceso de la estación de bombeo; con el objetivo de medir su distribución y concentración en 8 puntos del sistema de alcantarillado (5 pozos de acceso, 2 pozos húmedos en estaciones de bombeo y un pozo en el terminal de la PTAR) en estos puntos se recolectaron datos de calidad y cantidad del flujo de agua, utilizaron las leyes físicas de principio de continuidad, conservación de masa y momento para detallar la forma y dirección de la propagación de onda en el espacio tiempo.

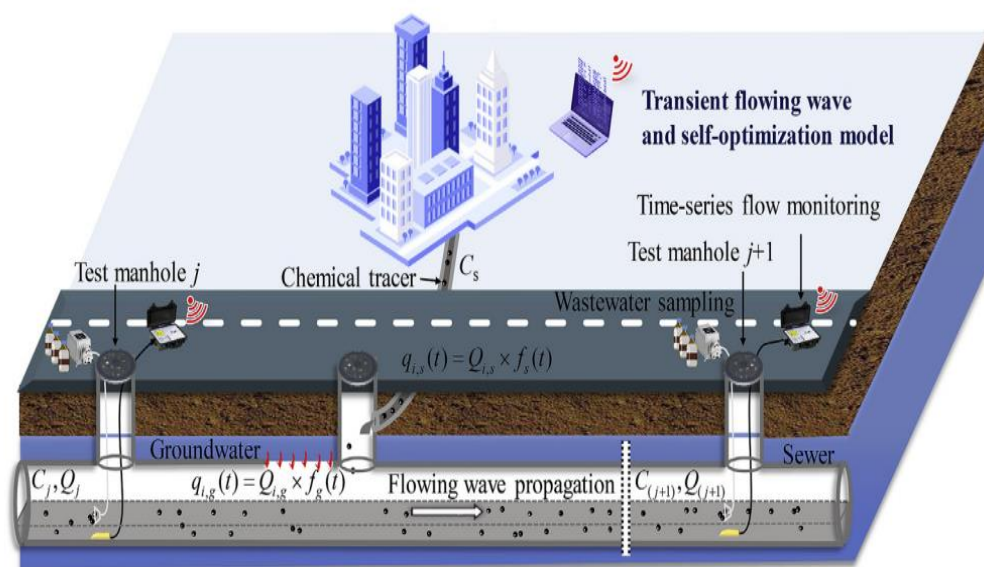
se utilizó SWMM para la simulación hidrodinámica del flujo y PYSWMM para añadir el algoritmo de auto optimización que controle la entrada de flujo en los nodos, el algoritmo utilizado es de tipo genético microbiano que ajusta automáticamente los parámetros del modelo para que los datos simulados sean lo más próximos a los datos reales, esta herramienta utiliza una población de posibles soluciones y con ayuda de operaciones generar mutaciones mejoradas que desarrollen nuevas soluciones que encajen con los datos observados, esto es posible debido a que la marcha del algoritmo se vuelve iterativa hasta que la diferencia de los datos en un tiempo observado in situ y simulados sean optimas. Con un balance de masa a



partir del flujo de agua y concentraciones del trazador químico, los investigadores pudieron encontrar que las partes de la red de tuberías que se encuentra por debajo del nivel freático, están sometidas a infiltración a través de grietas y juntas en la unión de tuberías, además concluyen en su trabajo, que la tasa de infiltración de aguas subterráneas hacia las redes de transporte del alcantarillado depende del nivel de agua que estas estén transportando.

Ilustración 9

Infiltración del agua hacia los sistemas de drenaje



Nota. Detección de la Infiltración del agua en alcantarillados pluviales. Tomado de (Z. Zhao et al., 2020).

Los autores(Wang et al., 2021) investigaron acerca del control de caudal en redes de alcantarillado con poco espacio, estas corresponden a las tuberías que trabajan muy cercanas



a su caudal de diseño. En la búsqueda del rendimiento de estas estructuras utilizaron dispositivos de control de flujo (DFC por sus siglas en inglés) para inundaciones de lluvia generados por la saturación de los alcantarillados combinados, en el estudio utilizaron swmm para simular diferentes eventos de escorrentía de aguas residuales e implementaron estrategias de control, con pyswmm para simplificar el proceso de ejecución de las simulaciones, los resultados del estudio se sustentan gracias a la recolección de datos de más de 300 episodios de precipitación con diferentes magnitudes de intensidad, mostrando que los sistemas de control son más eficaces cuando ocurren sucesos de lluvia relativamente pequeños en los que el sistema de drenaje urbano combinado es lo suficientemente grande para permitir reducciones con técnicas de control, alrededor del 80% de las intensidades pico estaban entre 10 y 20 mm/h, en los eventos de precipitación superior el control de flujo es más inestable debido al cambio de caudal en estructuras presurizadas y la acumulación de flujo en redes con poco espacio, el espacio de almacenamiento del sistema y los instrumentos para el control de flujo antes que se produzca un desborde son factores claves a tener en cuenta en la reducción de las inundaciones de alcantarillados combinados que tienen poca disponibilidad de acopio, la cual depende de la dinámica hidráulica del sistema y el volumen de agua acumulado en las tuberías aguas arriba.



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Otro factor importante es que la gestión de aguas pluviales y los procedimientos requeridos sean económicamente rentables, tanto en construcción, operación y mantenimiento, (Liang et al., 2022) presentan en su estudio de enfoque sin calibración para controlar los almacenamientos de aguas pluviales, un método llamado TFC ó control de flujo objetivo por la traducción de sus siglas en español, este tiene como misión gestionar las aguas pluviales para evitar el cambio en las infraestructuras de los alcantarillados que normalmente son muy costosas debido a la urbanización, el aumento de su densidad y los cambios climáticos.

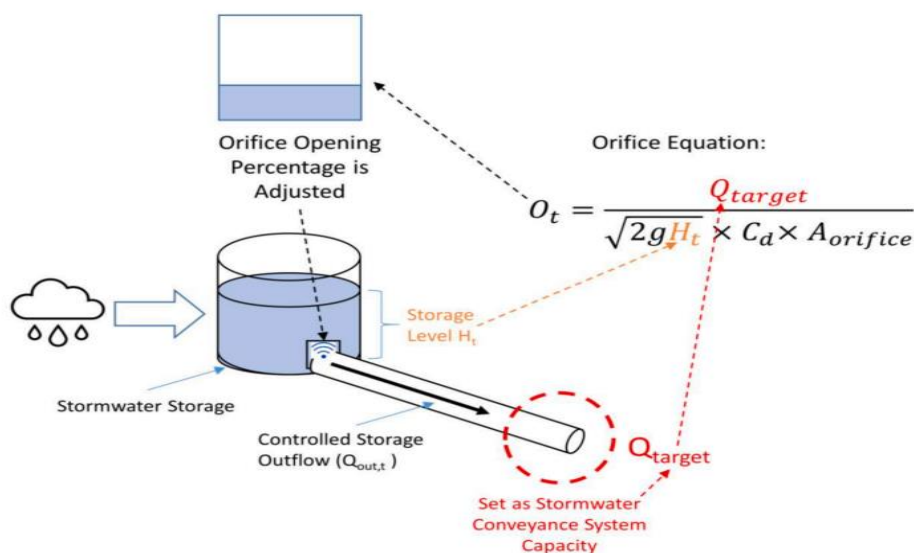
Una característica innovadora de este enfoque, es que no requiere calibración, es decir no dependen de las condiciones del sitio (topografía, área, intensidad de lluvia) sino del nivel del agua, y se basa en la medición en tiempo real con sensores de bajo costo, el estado de la capacidad de almacenamiento en los nodos de conexión o tanques de almacenamiento (pueden ser ubicados en cualquier lugar o en sitios estratégicos), en los sucesos de precipitaciones los sensores ayudan a calcular el porcentaje de apertura del orificio, estos se utilizan con el fin de mantener los flujos de salida en el sistema de drenaje en caudales objetivos ya especificados, o que estén por debajo de este nivel si es requerido, los resultados de este estudio son positivos y dan como producto las siguientes ventajas: No se requiere instalar tanques de almacenamiento conjuntos al sistema de drenaje, tampoco es necesario ajustar parámetros de la cuenca, su funcionamiento tiene un éxito del 95%, los errores máximos tienen un valor del 10%, se conserva y alarga la vida de funcionamiento de las estructuras (tuberías, pozos...).



Una parte innovadora para la parte de gestión de aguas pluviales es que se puede aprovechar en épocas de sequía, simplemente se requiere cerrar totalmente los orificios para permitir aprovechar el agua y a provecharla en los distintos usos que se requieran, además que la captación de escorrentía se mejora, las inundaciones en la zona disminuyen, las simulaciones de precipitación se realizan en SWMM y se utiliza PYSWMM, este mediador de lenguaje entre python y SWMM es el encargado de regular la apertura de los orificios de salida de los tanques de almacenamiento utilizando la ecuación de orificio que está en función (depende) de la altura del agua en las estructuras de acopio utilizadas para captar el agua de escorrentía, véase ilustración _ la cual describe gráficamente el funcionamiento de este enfoque.

Ilustración 10

Esquema conceptual del control de flujo objetivo





Nota. Control de flujo en tanques de almacenamiento. Tomado de (Liang et al., 2022)

3.10 Problemáticas presentes en los sistemas de desagüe urbano y soluciones propuestas para mejorar la Gestión de aguas pluviales

Es importante realizar una buena administración de las aguas pluviales, como se mencionó anteriormente, un mal manejo de las mismas puede convertirse en un peligro para una determinada comunidad y medio ambiente debido a su potencial devastador, ya que el agua puede arrastrar un gran número de contaminantes y objetos contundentes, enseguida, se procede a revisar trabajos realizados por distintos autores y que pueden utilizarse para mejorar la administración del agua pluvial.

(Lin et al., 2006) afirma que las estructuras que hacen parte del drenaje urbano, pueden ocasionalmente saturarse, desbordarse e inundar zonas urbanas; para el control de inundaciones con python y swmm, se puede hacer uso de sus múltiples librerías como pystorm, esta permitirá acceder a los datos de las simulaciones que se realicen con swmm, pudiendo incorporar sensores de presión en los nodos de conexión con el fin de poder conocer el estado de las redes de alcantarillado y controlar distintos dispositivos utilizados para la gestión del agua que circula en los sistemas de drenaje, esto permite regular la cantidad de flujo que transita a través de tuberías aledañas a la zona de inundación para que puedan trabajar con un nivel de lámina determinado, de esta manera se permite aliviar los conductos saturados.

Estas estrategias de gestión de aguas pluviales pueden ser aplicados en la ciudad de Cúcuta, por ejemplo, un suceso ocurrido a causa de las fuertes lluvias ocurridas en el año 2020, la gran cantidad de agua provocó que el sistema de drenaje pluvial colapsara y no fuera



capaz de evacuar con rapidez los grandes volúmenes de agua producto de este acontecimiento, volviendo las calles intransitables y causando una gran contaminación en el agua, en la ilustración 2 se puede observar como el nivel del fluido ascendió un poco menos de un metro de altura, representando un alto peligro para la población, ocasionando daños materiales, paralización en la prestación de servicios públicos, impacto en el normal desarrollo económico, afectación a animales callejeros, entre otras consecuencias.

Ilustración 11

Inundación en la ciudad de Cúcuta



Nota. *Inundación en la ciudad de Cúcuta* (fotografía), por Vanguardia, 2020, (<https://www.vanguardia.com/colombia/video-impresionante-inundacion-en-un-conjunto-residencial-de-cucuta-IG3118857>)



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
 Universidad de Pamplona
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



En el sector, estas inundaciones ocurren en la mayoría de veces en que hay precipitaciones de gran intensidad, el arrastre de sedimentos y materiales contaminantes como aceite, hacen que se alteren las propiedades del agua de los arroyos que entran al sistema de alcantarillado, generando impurezas y contaminación en los cuerpos hídricos donde se descarga el agua pluvial, de acuerdo con (Mason et al., 2021) la modernización con uso de tecnologías, permite que los sistemas de alcantarillado sean autónomos en cuanto a la regulación de la calidad del agua en tiempo real con la implementación de activos, además que se puede identificar las zonas exactas donde se produce la contaminación. Estos sucesos incentivan a implementar nuevas metodologías en el diseño de alcantarillados porque de la calidad del agua dependen la vida marina y terrestre.

De acuerdo con (Figuerola et al., 2023) la carga hidráulica en las tuberías es afectada por la escorrentía producida por las lluvias y el cambio de las estaciones, los choques de temperatura pueden dañar los cuerpos receptores, alterar su régimen térmico y afectar incluso la vida acuática, por esto es indispensable que las autoridades locales en Colombia realicen revisiones continuas a las estructuras que se saturan consecuentemente en eventos de lluvia; para solucionar esta problemática se puede implementar el uso de tanques de almacenamiento la misma metodología utilizada por (Javier & Solano, 2019), así pues también se podría automatizar partes del sistema de alcantarillado para que autorregule los flujos y así también evitar las inundaciones.

Los caudales de escorrentía se ven alteradas por la capacidad de entrada de los sumideros que hacen parte de los sistemas de desagüe, de acuerdo con (Leitão et al., 2017) las





condiciones en que se encuentren los sumideros de los alcantarillados determinan el rendimiento del sistema, y su mala condición conduce inundaciones pluviales urbanas, (Gómez et al., 2013a) sostiene que el polvo y muchos materiales como los desechos, basura o sedimentos, tapan los espacios vacíos por donde entra el agua al sistema de alcantarillado, siendo estos los culpables de arrojar errores en las simulaciones y disminuir su eficiencia en la vida real; este es un factor de análisis importante que se tiene que tener en cuenta en la simulación y modelamiento de las estructuras que hacen parte de los sistemas de drenaje, (Gómez et al., 2013b) En su investigación para determinar la obstrucción en bocas de rejillas de alcantarillados en una cuenca en la ciudad de Barcelona, concluye que se puede extrapolar los valores de coeficientes de obstrucción encontrados, estos varían en un rango desde 0,265 hasta 0,674; también afirma que esto es posible ya que en muchas ciudades del mundo las entradas de los sumideros son muy parecidas, además concluye que se puede adoptar un valor de 0,5 como lo recomiendan muchas normativas importantes a nivel mundial como la de Estados Unidos, cabe resaltar que la elección de ese mismo valor no tiene una sustentación científica que argumente su adopción.

El problema de taponamiento de los sumideros ocurre en muchas partes de Colombia, un claro ejemplo es el de la ilustración 3, este sumidero está localizado en una zona comercial de la ciudad de Pamplona (Colombia), se puede evidenciar como la falta de cultura ciudadana ha llevado a tener un sumidero en un 100% deficiente, ya la capacidad de entrada se encuentra obstruida, y la acumulación de distintos materiales han bloqueado el paso del agua a través de la tubería.



Ilustración 12

Pérdida de capacidad de entrada de sumidero



Nota. *Taponamiento de sumidero* (fotografía), Fuente propia, 2023.

Para mejorar la gestión de aguas pluviales en estas situaciones se debe tener equipo de mantenimiento para que realice la respectiva limpieza de los sumideros, notablemente en este punto en eventos prolongados de lluvia se pueden generar desbordamientos de agua y convertirse en focos de enfermedades, las autoridades deberían prestar más atención a estas



situaciones, realizar más campañas de culturización hacia la población e impartir sanciones a quienes incurran en estos hechos que afectan a toda una comunidad.

En el año 2019 ocurrió lo anteriormente mencionado en el municipio de San Pablo Nariño, debido a las fuertes lluvias, se aumentó el caudal de los arroyos que fluyen por las calles, el arrastre de sedimentos, materia orgánica y desechos materiales fueron los causantes de haber taponado las entradas del alcantarillado, bloqueando el paso del agua residual hacia el sistema de evacuación de agua, véase la ilustración 13.

Ilustración 13

Inundación producto de taponamiento de sumideros causadas por arrastre de sedimentos



Nota. Inundación en Municipio de San Pablo Nariño (fotografía), por rcn radio, 2022, (<https://www.rcnradio.com/colombia/sur/lluvias-en-san-pablo-narino-dejan-mas-de-400-viviendas-afectadas>)



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Frente a los distintos fenómenos meteorológicos el agua representa un peligro inminente si no se evacua a tiempo, un claro ejemplo de esto es lo ocurrido en Alicante en el año 1997 donde las lluvias torrenciales causaron estragos en esa ciudad, ocasionando muchos daños materiales, grandes pérdidas económicas, y lo peor de todo, desaparición de 5 vidas humanas; lo ocurrido en esa ciudad (véase ilustración 5), no es ajeno a las demás ciudades en el mundo, muchos de los sucesos naturales pueden repetirse u ocurrir en diferencia de magnitud en cualquier lugar, (W. Yang et al., 2023) destaca la necesidad buscar e implementar métodos con mayor precisión y eficiencia en las simulaciones de inundaciones urbanas, con estas herramientas se busca evitar y disminuir los impactos que generan las inundaciones hacia la sociedad y el medio ambiente, de acuerdo con (Liang et al., 2022) es probable que el estado actual de las estructuras de los sistemas de desagüe urbano no puedan satisfacer la necesidad de evacuar los picos de escorrentía proyectadas, debido principalmente a los cambios climáticos extremos, como consecuencia lo más probable es que se necesite remodelar o cambiar las costosas estructuras que componen el sistema de drenaje.



Ilustración 14

inundación en Alicante, España



Nota. *Inundación en ciudad de Alicante* (fotografía), por el periodico,2022,
(https://www.elperiodic.com/alicante/cumplen-anos-gran-riada-inundo-alicante-dejo-victimas-mortales_852273)

Una posible solución a esta problemática es la implementación de tanques de almacenamiento combinada con la tecnología RTC, además de implementar las nuevas tendencias de sistemas de desagüe, conocidos como sistemas de drenaje urbano sostenible SUDS, una buena opción es la implementación de pavimentos porosos (se hablará más adelante y se darán más detalles sobre estas estructuras), este tipo de pavimento es útil en zonas donde la pendiente del terreno no cambia significativamente, lo que permitirá que el agua se infiltre hacia el subsuelo para que el agua no se quede estancada sin un camino para donde fluir.



En Colombia muchas de las zonas urbanas y semiurbanas no disponen de un sistema de desagüe pluvial adecuado, y muchos de los acontecimientos de lluvia pueden resultar en inundaciones superficiales peligrosas, de acuerdo con (IDEAM, n.d.) las fuertes lluvias pueden ocasionar crecientes súbitos en la cabecera de una cuenca, las áreas de afectación no son muy grandes pero existe mayor potencial de destrucción, incluso puede acabar con vidas de personas, de acuerdo con (Garzón Díaz, 2019) en Colombia y como también ocurre en muchos lugares del mundo se necesita tener índices de medición que permitan evaluar y clasificar cual será el peligro y los daños que pueden representar las inundaciones.

3.11 Errores que se cometen en las simulaciones de drenaje urbano y afectan la gestión de aguas pluviales

minimizando muchos errores que no se tienen en cuenta al momento de realizar simulaciones, a continuación, se nombran los más frecuentes:

- ignorar la capacidad de entrada de los sumideros
- no estacionariedad del ambiente natural
- factores externos que bloqueen el paso normal del agua cuando se transforma en escorrentía.

En la ilustración 6 se puede observar el taponamiento de un sumidero.



Ilustración 15

Taponamiento de sumidero



Nota: Sumidero ubicado en la ciudad de Pasto Nariño: Barrio Santa Barbara. Fuente propia, 2023.

Con la versatilidad de solución que ofrecen los algoritmos de python, se pueden automatizar las estructuras de las redes de drenaje para disminuir la saturación de las tuberías, detectar el flujo de agua extra hacia las redes de alcantarillado producto de la infiltración subterránea o conexiones ilícitas.

A pesar de los grandes avances en modelamiento y construcción de estructuras hidráulicas, se debe seguir investigando e incluir los nuevos detalles encontrados para



implementarlos en técnicas mejoradas, ya sea para la simulación de eventos de lluvia o modelamiento de redes hidráulicas, con el fin de variar posibles comportamientos del agua en sucesos de precipitaciones y buscar una solución acorde a los problemas que puedan presentar las distintas estructuras o evitar inundaciones que puedan presentarse.

Según Leitão et al., (2017) muchos de los problemas que se pueden presentar en las simulaciones de drenaje urbano, es que no siempre se tiene en cuenta el estado de los sumideros o su cercanía a elementos que puedan obstruir su entrada, lo que ocasiona que el agua que debería captarse en ese punto continúe escurriéndose por la superficie y no se entre al sistema de drenaje, lo que ocasiona que el fluido sea captado en otro punto y genere en las tuberías cargas de flujo superiores a las de diseño, llevando a ocasionar contraflujos en el sistema y posibles inundaciones, además de que no se aprovecha en la totalidad el funcionamiento de todas las estructuras que componen el alcantarillado, en la ilustración 7 se puede observar como la basura y muchos sedimentos ocasionan el bloqueo de la capacidad de entrada de un sumidero o de su colector.



Ilustración 16

Bloqueo de la capacidad de entrada de un sumidero



Nota. *Taponamiento de sumidero* (fotografía), Fuente propia, 2023.

Este es un factor que debería obligatoriamente tenerse en cuenta a la hora de hacer simulaciones de drenaje urbano, debido a que las obstrucciones hacen que los caudales que va a transportar cada tubería sean diferentes, y en cambio de acuerdo al sentido del flujo del agua sean los sumideros y tuberías posteriores los que se saturan y pueden ocasionar desbordamientos de agua hacia la superficie.

(Rimer et al., 2023) aconseja que antes de implementar estrategias de control para las redes de alcantarillado, no se debe optar por implementar varias soluciones, sino más bien, realizar una simulación para obtener una serie de soluciones en entornos computacionales para luego si implementarlos en escenarios reales.



Otro problema altamente influyente en los resultados de inundaciones superficiales en áreas urbanas arrojados por las simulaciones, es el uso del supuesto de la estacionariedad, bajo este aparente se plantea que los datos hidrológicos a lo largo del tiempo no varían y por el contrario se mantienen constantes, de acuerdo con (L. Yang et al., n.d.) la tendencia de muchos datos hidrológicos regionales han sufrido muchas variaciones y discontinuidades producto de los fuertes cambios climáticos de los últimos años, y es posible que los estándares anteriores de los sistemas de drenaje ya no sean válidos, el autor (Garzón Díaz, 2019) plantea que la forma correcta de adquirir las variables meteorológicas futuras se requiere emplear técnicas que permitan satisfacer aproximaciones más precisas en situaciones de cambio climático, Las inundaciones urbanas y la escorrentía en general se han convertido en problemas importantes para muchas ciudades y regiones, debido a una combinación de patrones de precipitación alterados, crecimiento urbano y desarrollo en las llanuras aluviales , y aumentos en las superficies impermeables(Gray et al., 2023) .

De acuerdo con (Leitão et al., 2017) esto se debe a que tradicionalmente, en el modelado de drenaje urbano, la escorrentía se dirige directamente al sistema de alcantarillado, sin tener en cuenta la capacidad de entrada. Como consecuencia, las inundaciones solo ocurrirían cuando el sistema de alcantarillado se sobrecargue, independientemente del aforo hidráulico que soporten las bocas del sistema de drenaje, (Rimer et al., 2023) asegura, que los trabajos de simulación se realizan específicamente para ciertas áreas, por lo que intentar extrapolarlas hacia otra zona de estudio es de alta complejidad y no siempre es efectivo.





De acuerdo con (Leitão et al., 2017) los modelos de drenaje urbano están sujetas a varias fuentes de incertidumbre, como los datos de entrada y condiciones operativas de los componentes del sistema.

(W. Yang et al., 2023) argumenta que el ancho y pendiente influyen en los resultados de simulaciones en SWMM, para resolver la ruta de escurrimiento este software utiliza la pendiente media de la cuenca, pero esta metodología no permite describir con exactitud la pendiente de la ruta de escurrimiento, ocasionando que la precisión del modelo disminuya.

De acuerdo a un estudio desarrollado por (Z. Zhao et al., 2020) los resultados de cuantificación de caudal por infiltración pueden representar aproximadamente la mitad del caudal que transportan las redes de tuberías de los alcantarillados.

3.12 Soluciones a los errores de simulación

Con python se pueden crear aplicativos para mejorar las simulaciones de lluvia realizadas en swmm para la gestión de agua pluvial y tener un mayor porcentaje de certeza del comportamiento que tiene el flujo de agua en las redes de alcantarillado, llegando a ser estos muy próximos a la realidad, por estos motivos se presentan estrategias con el fin de corregir los errores que se cometen en las simulaciones.

Los autores (Leitão et al., 2017) proponen un método para modelar sistemas de drenaje urbano teniendo en cuenta las condiciones en los que se encuentran los sumideros, esta consta de tres pasos principales: (i) identificación de las entradas de alcantarillado más propensas a obstruirse con base en un análisis espacial de su proximidad a los árboles y la evaluación de



las ubicaciones de las entradas de alcantarillado; (ii) simulación de Monte Carlo de la capacidad de las entradas propensas a obstruirse y posterior simulación de inundación para cada escenario de capacidad de entrada del alcantarillado, y por último la (iii) delineación de mapas estocásticos de peligro de inundación, esto permitirá que los parámetros de la simulación puedan ser variados rápidamente para cumplir con las condiciones que el sistema de drenaje presenta en un tiempo determinado, este proceso es iterativo pero es rápido debido a que ya se reconoce el punto donde los parámetros hidráulicos cambian.

De acuerdo con (L. Yang et al., n.d.) una solución para el problema de la no estacionariedad es la calibración de los modelos de simulación, esto se puede lograr a partir de la recolección de datos hidrológicos y conjugándolos con datos de inundaciones pasadas, es decir, a partir de información recolectada de inundaciones pasadas, se puede realizar comparaciones y buscar similitudes en los hechos ocurridos con el fin de poder hacer frente a estos fenómenos naturales, claro está que para lograr esto, se debe dotar de tecnología a los sistemas de drenaje.

3.13 Buenas prácticas de diseño e implementación de Sistemas de drenaje sostenible para mejorar la gestión de aguas pluviales

A continuación, se presentan pautas que ayudaran a tener un buen manejo de las aguas lluvias, se presentan algunas de las soluciones que conforman una nueva vanguardia para la administración de aguas pluviales.

Hoy en día los diseños de estructuras y sistemas hidráulicos deben estar fundamentados por criterios de ingenieros con vasta experiencia en obra y diseño, tener conocimientos y habilidades para manejar distintos softwares que simulen los comportamientos





más críticos a los que vayan a estar expuestas las redes hidráulicas, con el fin de obtener un sistema funcional y óptimo ante la ocurrencia de eventos naturales, ya sean continuos o que ocurran cada cierto periodo de tiempo.

Las obras hidráulicas futuras a diseñar deben seguir las actuales vanguardias para con el diseño y modernización de alcantarillados que utilizan en países desarrollados como China, Estados Unidos o Japón; estos países han optado por incluir en las estructuras de drenaje sensores que envían información remotamente a un centro de control o estableciendo una intercomunicación entre los mismos dispositivos, de acuerdo con (Wang et al., 2021) estos se pueden ubicar en las estructuras que los conforman (salida y entrada en de los nodos, tuberías), la ventaja de estos es que permite gestionar el funcionamiento de los distintos componentes (válvulas, orificios, tanques de almacenamiento, etc), para lograr el mejor funcionamiento del sistema de desagüe pluvial y reducir los impactos negativos hacia el medio ambiente.

(Lorena et al., n.d.) recomiendan que además se debe optar por la contratación de personal capacitado para que se encarguen del manejo de estos softwares, ya que muchos de estos pueden tener licencias costosas que pueden influir en la gestión proyectada del sistema de drenaje urbano, esto permite que las actuales estructuras funcionen y cumplan con el objetivo para las cuales fueron construidas además de alargar su periodo de vida útil.

Poner en práctica las estrategias de control en tiempo real (RTC) para los sistemas de almacenamiento tuberías de los sistemas de alcantarillado (ya existentes o los que se vayan a





diseñar), brindan oportunidades para que las estructuras de sistema de drenaje puedan adaptarse y funcionar de forma eficiente ante la incertidumbre de aumentos en los caudales máximos (superiores a los ya proyectados) producto del calentamiento global, el aumento de la demografía y el urbanismo, permitiendo que las tuberías trabajen cerca o por debajo de los caudales de diseño, RTC permiten alargar la vida útil de las estructuras, además de brindar beneficios adicionales en la calidad del agua y la reutilización de la misma.

La integración de tanques de almacenamiento contiguos a las redes de alcantarillados, permite reducir la saturación de fluido que se encuentran en las tuberías, (Javier & Solano, 2019) destaca que el uso de estas estructuras de acopio son muy eficientes, pero como generalmente estos espacios en los nudos de conexión son tan pequeños, es necesario hacerlos de un mayor tamaño de lo que normalmente se acostumbra, agrega que los costos de esta estrategia no son tan elevados al solo depender del coste de los tanques y las explanaciones, siendo el área de instalación el único factor de análisis, también sostiene que estos tanques devuelven el agua hacia las redes del sistema de desagüe en el mejor momento.

Para la modernización de las actuales estructuras de desagüe urbano y futuros diseños de estas estructuras, las soluciones apoyadas en la naturaleza representan en la actualidad un hito para el cuidado de la misma y reducción de los impactos negativos hacia el medio ambiente, de acuerdo con (Pons et al., 2023) las infraestructuras verdes (IG) han surgido como nuevas alternativas para regular el agua que escurre por las zonas urbanas y mejorar la modelación de sistemas hidrológicos.





Siendo una de las metodologías más innovadoras que aprovechan la capacidad de la naturaleza para autorregularse, las estructuras verdes o también llamados SUDS (sistemas urbanos de drenaje sostenible), permiten reducir en gran medida los caudales de escorrentía que ingresan a los sistemas de alcantarillado, además que protegen el ciclo hidrológico, existen muchos tipos de SUDS, a continuación, se presentan las diferentes estructuras que se pueden implementar en zonas urbanas:

Techos ecológicos: Estas estructuras permiten captar el agua lluvia en las cubiertas de los hogares, permitiendo absorber el agua y que esta no se convierta en escorrentía, pueden tener muchas formas y diseños, consisten en una variedad de plantas y vegetación, que además representar buenos aspectos estéticos, ayudan a purificar el aire y regular la temperatura de las edificaciones.



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
 Universidad de Pamplona
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Ilustración 17

Cubiertas ecológicas



Nota. Techos verdes o *cubiertas ecológicas* (imagen), Amarillo,2019,
(<https://amarilo.com.co/blog/verde/el-poder-descontaminante-de-los-techos-verdes/>)

Pavimentos permeables: Este tipo de estructuras, son los que favorecen en mayor medida el ciclo hidrológico y la reducción de agua de escorrentía que entra en los sistemas de alcantarillados, ya que al caer la precipitación el agua cae directamente sobre la superficie permeable del pavimento, (Trujillo Lopez & Quiroz Lasprilla, n.d.) afirma que luego de la percolación del agua a través de estas estructuras, retarda el escurrimiento del agua pluvial que cae sobre este, y luego es diferida hacia el medio natural, esta es una de las mejores opciones para reducir la gran brecha que existe entre el ciclo del agua en el medio natural y el ciclo del agua en áreas urbanizadas, en la ilustración se puede observar como el concreto y pavimento

poroso, favorecen la infiltración del agua y reducen el encharcamiento, otra ventaja de estas estructuras es que son muy versátiles en cuanto a su implementación, ya que pueden utilizarse ya sea en vías con altas y bajas pendientes.

Ilustración 18

Comparación entre un pavimento impermeable vs uno permeable



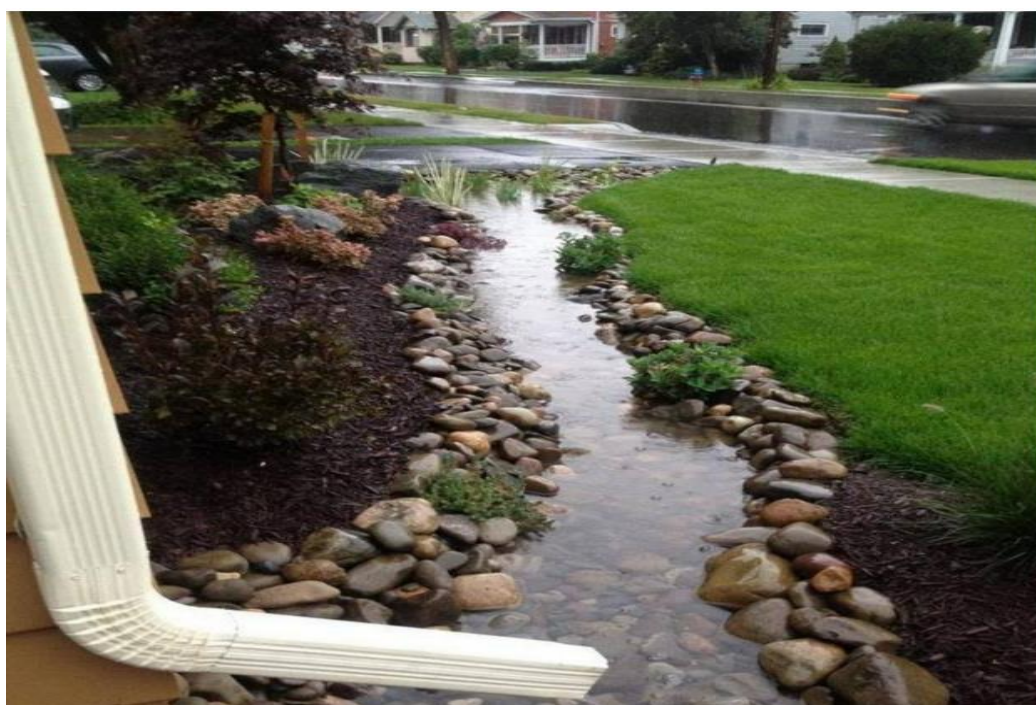
Nota. *Diferencia entre pavimentos impermeables vs permeables* Tomado de (Trujillo Lopez & Quiroz Lasprilla, n.d.)

Jardines de lluvia: son áreas con vegetación natural, estas permiten que el agua que cae sobre las mismas se infiltre y disminuya la escorrentía urbana, (Ossa-Moreno et al., 2017) sostiene que la implementación de estos sistemas ha traído resultados satisfactorios en las ciudades alrededor del mundo donde se han implementado, no solo por el embellecimiento

estético, sino también porque ayudan a que el agua se infiltre, y la vegetación ayude a regular la temperatura.

Ilustración 19

Jardín de lluvia



Nota. *Jardin de lluvia* (imagen), por La voz del muro, 2019, (<https://lavozdelmuro.net/los-jardines-de-lluvia-la-nueva-tendencia-de-los-lugares-donde-llueve-frecuentemente/>)

canales permeables o eco cunetas: Son estructuras que contienen vegetación en sus laterales y en su base, de acuerdo con (V Missa et al., 2002) están transportan el agua de escorrentía hasta un depósito final aguas abajo mientras parte del agua que transportan se

infiltra en el suelo y a su vez evita que esta se contamine en el trayecto, una alternativa para reducir costos de construcción y contaminación hacia el medio ambiente, véase la ilustración:

Ilustración 20

Ecocuneta o canal verde



Nota. *Ecocuneta o canal verde* (imagen), por La voz del muro,2019, (<https://lavozdelmuro.net/los-jardines-de-lluvia-la-nueva-tendencia-de-los-lugares-donde-llueve-frecuentemente/>)

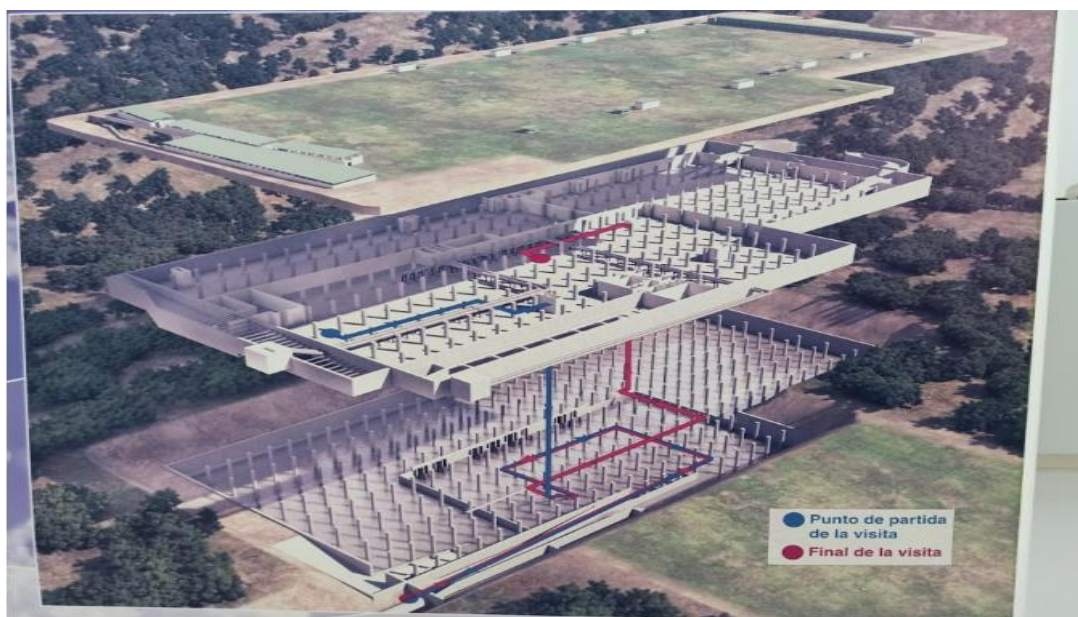


Tanques de almacenamiento o de Tormenta: son depósitos de aguas lluvias, consisten en un tanque que permite almacenar el agua de escorrentía, con procesos de control evacuan el agua en las redes de alcantarillado en momentos oportunos para no saturar las redes de alcantarillados, pueden ser naturales (Superficie superior recubiertos de vegetación) o artificiales, (Kumar et al., 2020) defiende a los últimos, debido a que estos están compuestos por mallas filtrantes que retiene solidos de tamaño considerable, disminuyendo la contaminación hídrica, además estos tanques permiten reutilizar el agua de lluvia, una buena alternativa para mejorar la administración de aguas pluviales en el mundo, el tanque de tormentas de Arroforesno es el más grande del mundo y se encuentra en Madrid.

Ilustración

21

Tanque de Tormenta de Arroforesno ubicado en Madrid



Nota. Tanque de Tormenta de Arroforesno (imagen), por Pedro Caceres,2020,
(<https://www.elagradiario.com/agua/el-mayor-tanque-de-tormentas-del-mundo-esta-en-madrid/>)



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



4. Conclusiones

El uso de herramientas tecnológicas como python, ayuda a disminuir el tiempo de simulación de eventos de lluvia en swmm utilizados para el diseño de sistemas de desagüe (alcantarillados), estos procesos demoran mucho tiempo por ser iterativos, además de que python ayuda a tener factores que muchas veces no se tienen en cuenta en una simulación, ayudando a que los procesos de simulación permitan diseñar estructuras de drenaje que funcionen de buena forma ante eventos fuertes y prolongados de lluvia en la vida real.

La buena gestión de aguas pluviales puede ayudar a disminuir el peligro que representan los grandes volúmenes de agua producto de precipitaciones, para lograrlo es importante tener redes de drenaje urbano totalmente funcionales, con las actuales tecnologías y avances en las metodologías para el control de las escorrentías, se pueden mejorar estructuras de alcantarillados ya existentes y optimizar su funcionamiento sin necesidad de tener que construir estructuras nuevamente desde cero, una alternativa económica y muy fiable es adaptar las estructuras de los alcantarillados tecnológicamente para que sus conductos no se saturen, ya sea con el RTC través de sensores de presión, tanques de almacenamiento, o el uso de las soluciones apoyadas en la naturaleza, estas permiten restablecer los distintos ciclos naturales como lo es el del agua, permitiendo que se infiltre hacia el suelo y disminuya la gran brecha formada por el cambio climático y el desarrollo del mundo en que vivimos entre el ciclo hidrológico de la naturaleza y el ciclo hidrológico urbano, así también con ayuda de los sistemas urbanos de drenaje sostenible, se puede revertir a nuestro favor el cambio climático, áreas permeables alivianan la carga hidráulica de los sistemas de desagüe, mejorando la gestión de aguas pluviales.

“SI TUVIERA LA SUERTE DE ALCANZAR ALGUNO DE MIS IDEALES, SERIA EN NOMBRE DE TODA LA HUMANIDAD” ; POR NIKOLA TESLA



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



5. Referencias

- Álvarez, A., García-Rendueles Acacia, N., & García-Rendueles, N. (n.d.). *INTRODUCCIÓN AL CÁLCULO DE REDES DE SANEAMIENTO CON SWMM* Jose Anta Álvarez Acacia Naves García-Rendueles Juan Naves García-Rendueles.
- Bonells, J. E. (n.d.). *REVESTIMIENTO DE SUELOS – Jardines sin fronteras*. Retrieved August 8, 2023, from <https://jardinessinfronteras.com/2021/11/28/revestimiento-de-suelos-y-carreteras/>
- Cubides, E., & Santos, G. (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>
- Dawson, R. J., Speight, L., Hall, J. W., Djordjevic, S., Savic, D., & Leandro, J. (2008). Attribution of flood risk in urban areas. *Journal of Hydroinformatics*, 10(4), 275–288. <https://doi.org/10.2166/hydro.2008.054>
- Espinosa Gutiérrez, G., Mareike Evers, P., Otterpohl, R., Paredes Limas, J. C., Zambrano Cárdenas, R. M., & González Torres, L. (2015). Evaluación de las infiltraciones al sistema de drenaje mediante análisis comparativo de la concentración de contaminantes en agua residual: Caso de estudio en Tepic, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(1), 89–98. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992015000100007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Figueroa, A., Hadengue, B., Leitão, J. P., & Blumensaat, F. (2023). A framework for modelling in-sewer thermal-hydraulic dynamic anomalies driven by stormwater runoff and seasonal effects. *Water Research*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119492>
- Garzón Díaz, J. A. (2019). *a tesis buena aplicacion*.



Global Health, D. of P. D. and M. (n.d.). *Agua*. Retrieved May 15, 2023, from <https://www.cdc.gov/parasites/es/water.html>

Gómez, M., Rabasseda, G. H., & Russo, B. (2013a). Experimental campaign to determine grated inlet clogging factors in an urban catchment of Barcelona. *Urban Water Journal*, 10(1), 50–61. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.690435>

Gómez, M., Rabasseda, G. H., & Russo, B. (2013b). Experimental campaign to determine grated inlet clogging factors in an urban catchment of Barcelona. *Urban Water Journal*, 10(1), 50–61. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.690435>

Gray, L. C., Zhao, L., & Stillwell, A. S. (2023). Impacts of climate change on global total and urban runoff. *Journal of Hydrology*, 620, 129352. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.129352>

Holguín, C., Díaz-Ricardo, Y., & Antonio Becerra-García, R. (n.d.). *Ciencias Holguín, Revista trimestral, Año XX, abril-junio 2014 El lenguaje de programación Python/The programming language Python Ivet Challenger-Pérez*. <http://www.linuxjournal.com/article/2959>

IDEAM. (n.d.). *AMENAZAS INUNDACIÓN - IDEAM*. Retrieved May 16, 2023, from <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>

Javier, F., & Solano, M. (2019). *UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA Urban drainage network rehabilitation considering storm tank installation and pipe substitution*.

Kumar, M., Furumai, H., Kasuga, I., & Kurisu, F. (2020). Metal partitioning and leaching vulnerability in soil, soakaway sediments, and road dust in the urban area of Japan. *Chemosphere*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126605>

Lazo Sandoval, E. M. (2014). *Integración de un SIG y un modelador hidráulico aplicado al diseño de alcantarillados*.



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
 Universidad de Pamplona
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



- Leitão, J. P., Simões, N. E., Pina, R. D., Ochoa-Rodriguez, S., Onof, C., & Sá Marques, A. (2017). Stochastic evaluation of the impact of sewer inlets' hydraulic capacity on urban pluvial flooding. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31(8), 1907–1922. <https://doi.org/10.1007/S00477-016-1283-X/FIGURES/16>
- Liang, R., Maier, H. R., Thyer, M. A., Dandy, G. C., Tan, Y., Chhay, M., Sau, T., & Lam, V. (2022). Calibration-free approach to reactive real-time control of stormwater storages. *Journal of Hydrology*, 614. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128559>
- Liang, R., Thyer, M. A., Maier, H. R., Dandy, G. C., & Di Matteo, M. (2021). Optimising the design and real-time operation of systems of distributed stormwater storages to reduce urban flooding at the catchment scale. *Journal of Hydrology*, 602. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126787>
- Lin, S. S., Hsieh, S. H., Kuo, J. T., Liao, Y. P., & Chen, Y. C. (2006). Integrating legacy components into a software system for storm sewer simulation. *Environmental Modelling and Software*, 21(8), 1129–1140. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.05.012>
- Lorena, M., Anzola, R., Freddy, J., & Duarte, R. (n.d.). *MODELACIÓN Y EVALUACIÓN HIDRÁULICA DEL ALCANTARILLADO DEL MUNICIPIO DE CHOCONTÁ-CUNDINAMARCA, MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE EPA SWMM*.
- Mason, B. E., Mullapudi, A., & Kerkez, B. (2021). StormReactor: An open-source Python package for the integrated modeling of urban water quality and water balance. *Environmental Modelling and Software*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105175>
- Ossa-Moreno, J., Smith, K. M., & Mijic, A. (2017). Economic analysis of wider benefits to facilitate SuDS uptake in London, UK. *Sustainable Cities and Society*, 28, 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.10.002>



Pons, V., Abdalla, E. M. H., Tscheikner-Gratl, F., Alfredsen, K., Sivertsen, E., Bertrand-Krajewski, J. L., & Muthanna, T. M. (2023). Practice makes the model: A critical review of stormwater green infrastructure modelling practice. In *Water Research* (Vol. 236). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119958>

Rimer, S. P., Mullapudi, A., Troutman, S. C., Ewing, G., Bowes, B. D., Akin, A. A., Sadler, J., Kertesz, R., McDonnell, B., Montestruque, L., Hathaway, J., Goodall, J. L., Norton, J., & Kerkez, B. (2023). pystorms: A simulation sandbox for the development and evaluation of stormwater control algorithms. *Environmental Modelling and Software*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105635>

SANTODOMINGO ZULETA, E. A. (n.d.). *uniandesu754488*.

Sytsma, A., Bell, C., Eisenstein, W., Hogue, T., & Kondolf, G. M. (2020). A geospatial approach for estimating hydrological connectivity of impervious surfaces. *Journal of Hydrology*, 591. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125545>

Teymouri, E., Wong, K. S., & Mohd Pauzi, N. N. (2023). Iron slag pervious concrete for reducing urban runoff contamination. *Journal of Building Engineering*, 70, 106221. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.106221>

Trujillo Lopez, A., & Quiroz Lasprilla, D. (n.d.). *Pavimentos Porosos Utilizados Como Sistemas Alternativos Al Drenaje Urbano*.

V Missa, I Tarnaras, C Papavasiliou, S Papatzani, & E Aftia. (2002). *Project under EU RTD 5 th Framework Programme Adaptive Decision Support System (ADSS) for the Integration of Stormwater Source Control into Sustainable Urban Water Management Strategies*. www.daywater.org

Van Thieu, N., & Mirjalili, S. (2023). MEALPY: An open-source library for latest meta-heuristic algorithms in Python. *Journal of Systems Architecture*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2023.102871>



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
 Universidad de Pamplona
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



- Wang, W., Leitão, J. P., & Wani, O. (2021). Is flow control in a space-constrained drainage network effective? A performance assessment for combined sewer overflow reduction. *Environmental Research*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111688>
- Xu, Z., Qu, Y., Wang, S., & Chu, W. (2021). Diagnosis of pipe illicit connections and damaged points in urban stormwater system using an inversed optimization model. *Journal of Cleaner Production*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126011>
- Yang, L., Li, J., Kang, A., Li, S., & Feng, P. (n.d.). *The Effect of Nonstationarity in Rainfall on Urban Flooding Based on Coupling SWMM and MIKE21*. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02522-7>
- Yang, W., Zheng, C., Jiang, X., Wang, H., Lian, J., Hu, D., & Zheng, A. (2023). Study on urban flood simulation based on a novel model of SWTM coupling D8 flow direction and backflow effect. *Journal of Hydrology*, 621. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129608>
- Zhao, M., Cao, G., Cao, S., Zhao, Q., Han, G., & Yan, X. (2023). Quantifying impact of climatic and anthropogenic factors on runoff in the source region of Alpine River in northeast Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47, 101423. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2023.101423>
- Zhao, Z., Yin, H., Xu, Z., Peng, J., & Yu, Z. (2020). Pin-pointing groundwater infiltration into urban sewers using chemical tracer in conjunction with physically based optimization model. *Water Research*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115689>

