

Implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible
(SUDS) para regulación de la escorrentía en el noroeste de la ciudad
de San José de Cúcuta, Norte de Santander

María Juliana López Forero



Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Programa Maestría en Ingeniería Civil
Énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente
2024

Implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)
para regulación de la escorrentía en el noroeste de la ciudad de San
José de Cúcuta, Norte de Santander

María Juliana López Forero

Tesis para optar al título de Magister en Ingeniería Civil

Dr. German Acero Riveros
Director

Universidad Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito
Programa Maestría en Ingeniería Civil
Énfasis En Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente
2024

Nota de Aceptación

La tesis de grado titulada “Implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) para regulación de la escorrentía en el noroeste de la ciudad de San José de Cúcuta, Norte de Santander” presentada por la ingeniera María Juliana López Forero, en cumplimiento de los requisitos exigidos por la universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, para optar al título de Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, fue aprobada por:

Jurado No. 1:

Dr. Germán Santos Granados

Jurado No. 2:

Ing. Manuel Antonio Contreras Martínez

Director:

Dr. German Eduardo Acero Riveros

Bogotá, D.C. enero 29 de 2024.

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	10
2.	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo General	11
2.2	Objetivos Específicos.....	11
3.	MARCO TEÓRICO	12
3.1	Generalidades de los SUDS	12
3.2	Estado del Arte.....	13
3.3	Requisitos exigidos en la normatividad	16
3.3.1	Resolución 0799 de 2021.....	16
3.3.2	Ministerio de Ambiente y desarrollo Sostenible	17
3.3.3	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP).....	17
3.3.4	Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	18
3.4	Modelación en PCSWMM.....	19
3.5	Modelación en SewerGems.....	20
4.	METODOLOGÍA	21
4.1	Descripción del problema	21
4.2	Generalidades del Municipio.....	25
4.2.1	Hidrología	26
4.2.2	Geología	26
4.2.3	Clima.....	26
4.3	Recopilación y Análisis de la información.....	26
4.3.1	Información Preliminar e identificación de zonas permeables	27
4.4	Análisis Hidrológico.....	28
4.4.1	Complemento de datos faltantes.....	29
4.4.2	Parámetros estadísticos iniciales.....	30
4.4.3	Distribución de datos mensuales multianuales.....	31
4.4.4	Prueba de bondad de ajuste	35
4.4.5	Curva de intensidad, duración y frecuencia (IDF's).....	37
4.5	Diagnóstico del Alcantarillado.....	39
4.5.1	Catastro de redes	41
4.6	Diseño Hidrológico de los SUDS	45
4.6.1	Determinación de hWQCV a partir de la profundidad de lluvia (hp).....	47
4.6.2	Determinación de Vc	48

4.7	Modelación Computacional en PCSWMM.....	49
4.7.1	Construcción Modelo Hidrológico	50
4.7.2	Configuración lluvia de Diseño en el Modelo Computacional	51
4.7.3	Modelación Hidrológica e Hidráulica.....	52
4.8	Modelación de los sistemas de alcantarillado en SewerGems	52
4.8.1	Definición del esquema físico y codificado de la red	52
4.8.2	Análisis de carga para flujos pluviales con SewerGEMS V8i.....	52
4.8.3	Componentes	55
4.8.4	Construcción del modelo hidráulico.....	55
4.8.5	Transito hidráulico de los caudales en redes de alcantarillado	55
4.8.6	Configuración del modelo.....	56
4.8.7	Representación de los SUDS en la modelación	58
4.8.8	Implementación de los SUDS en la modelación.....	62
4.9	Metodología de selección de tipologías y trenes de SUDS	65
4.9.1	Preselección de tipologías	66
4.9.2	Metodología para la evaluación y selección de tipología de SUDS	66
4.9.3	Conformación y evaluación de trenes de tratamiento	71
5.	RESULTADOS.....	73
5.1	Configuración Modelación computacional de la zona de estudio	73
5.2	Configuración lluvia de diseño	76
5.3	Modelación Hidráulica e hidrológica.....	77
5.4	Optimización del sistema	80
5.5	Selección de Tipologías.....	82
5.5.1	Evaluación de tipologías	88
5.6	Tanques de Almacenamiento	89
5.6.1	Diseño General.....	91
5.6.2	Diseño Hidrológico	91
5.6.3	Diseño Hidráulico	92
5.6.4	Dimensionamiento.....	95
5.6.5	Ajuste de la Red Proyectada.....	108
5.6.6	Análisis de Costos.....	108
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	132
7.	BIBLIOGRAFÍA	135

CONTENIDO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Cambios inducidos por el desarrollo urbano en la transformación lluvia-escorrentía.	12
Ilustración 2 Cadena de gestión de escorrentía de los sistemas de alcantarillado convencionales vs la aplicación de los sistemas SUDS (pozos/zanjas de infiltración).	14
Ilustración 3 Inundaciones presentadas en el Nororiente de la Ciudad de Cúcuta.....	21
Ilustración 4 Inundaciones en el sector de la Universidad Francisco de Paula Santander y el Colegio el Inem.	22
Ilustración 5 Zona de Estudio.	23
Ilustración 6 Zona de estudio.....	24
Ilustración 7 Zona de inundación.....	24
Ilustración 8 a) Canal en el barrio Ciudad Jardín. b) Captación del agua lluvia del barrio Ciudad Jardín. c) captación en el barrio tasajero. d) Canal en el barrio tasajero que conduce el agua al canal Bogotá.	28
Ilustración 9 Curva IDF de diseño.	39
Ilustración 10 Registro Fotográfico Catastro de redes.	42
Ilustración 11 Zona de estudio.....	44
Ilustración 12 Tratamientos en línea y fuera de línea.	45
Ilustración 13 Flujos y procesos en tratamiento por retención.	46
Ilustración 14 Flujos y procesos en tratamiento por detención.....	47
Ilustración 15 Herramienta conexión Directa.	50
Ilustración 16 Herramienta para crear tormentas de diseño.	51
Ilustración 17 Opciones de Simulación.....	52
Ilustración 18 Modelación con Bentley SewerGEMS V8i.	53
Ilustración 19 Modelación con Bentley SewerGEMS V8i.	53
Ilustración 20 Herramienta Model Builder.	54
Ilustración 21 Migración de los datos recolectados al modelo.	54
Ilustración 22 Celdas de Bioretención.	58
Ilustración 23 Jardines de Lluvia.....	59
Ilustración 24 Techos verdes.....	59
Ilustración 25 Zanjas de Infiltración.	60
Ilustración 26 Sistemas de pavimento poroso continuo.	60
Ilustración 27 Barriles de Lluvia.....	61

Ilustración 28 Desconexión en la Azotea.....	61
Ilustración 29 Pantanos con vegetación.	62
Ilustración 30 Resumen de rendimiento LID.	65
Ilustración 31 Modelo Zona de Estudio.....	73
Ilustración 32 Vista general modelo 2D.	74
Ilustración 33 Mallas hexagonales creadas.	75
Ilustración 34 Conexión 1D con 2D.	76
Ilustración 35 Hietogramas de tormenta para zona de estudio.	77
Ilustración 36 Mapa de inundación TR 2 Años.	78
Ilustración 37 Mapa de inundación TR 100 Años.....	79
Ilustración 38 Red optimizada.	81
Ilustración 39 Diámetros Red optimizada.	82
Ilustración 40 Almacenamiento: hidrogramas de entrada y salida.	90
Ilustración 41 Volumen de almacenamiento en función de la duración de la tormenta.	93
Ilustración 42 Aplicación sencilla del enrutamiento de grupos de niveles.	94
Ilustración 43 Ubicación de los tanques de tormenta.....	95
Ilustración 44 Sistema de conexión del tanque de almacenamiento y la red convencional.	96
Ilustración 45 Implementación tanque de tormenta en la modelación.....	101
Ilustración 46 Hidrograma de entrada y salida en la modelación.	102
Ilustración 47 Diagrama del tanque de tormenta en planta.....	102
Ilustración 48 Vista en corte A-A' del tanque.	103
Ilustración 49 Vista en corte B-B' del tanque.	103
Ilustración 50 Red Ajustada con los tanques de tormenta.	108

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1 Factores para generación de curvas IDF.....	38
Tabla 2 Datos para curvas de IDF.....	38
Tabla 3 Tipologías de SUDS y valores de tiempo de drenaje, a y C.....	48
Tabla 4 Preselección de tipologías de SUDS de acuerdo con la selección de áreas potenciales.	66
Tabla 5 Calificación tipologías según eficiencia de remoción de contaminantes.	67
Tabla 6 Procesos de filtración y sorción.	68
Tabla 7 Calificación de las tipologías según el control de volúmenes de agua lluvia.	68
Tabla 8 Calificación tipologías según contribución a la amenidad.	69
Tabla 9 Calificación tipologías según conflictos de uso.	69
Tabla 10 Calificación tipologías según frecuencia de mantenimiento.	70
Tabla 11 Calificación tipologías según costos.	71
Tabla 12 Puntajes asignados según el desempeño de cada tipología de SUDS para los cinco procesos evaluados.	72
Tabla 13 Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según eficiencia de remoción de contaminantes.....	84
Tabla 14 Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según eficiencia de control de volumen de escorrentía.	85
Tabla 15 Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según contribución a la amenidad y conflictos de uso.....	86
Tabla 16 Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según frecuencia de mantenimiento.	87
Tabla 17 Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según costos.....	88
Tabla 18 Criterios de selección para tipologías de SUDS.....	88
Tabla 19 Matriz final de selección de tipologías.....	89
Tabla 20 Variables hidrológicas requeridas para el diseño de tanques de almacenamiento.....	92
Tabla 21 Datos de entrada.....	96
Tabla 22 Datos Hidrograma entrada.....	96
Tabla 23 Diámetros tubería de salida tanque de tormenta.	98
Tabla 24 Calculo de volúmenes de entrada y salida del tanque de tormenta 1.	99
Tabla 25 Dimensionamiento del tanque.	100
Tabla 26 Curva de calibración del Tanque.	101

Tabla 27 Cálculo de volúmenes de entrada y salida del tanque de tormenta 2.	104
Tabla 28 Cálculo de volúmenes de entrada y salida del tanque de tormenta 3.	105
Tabla 29 Cálculo de volúmenes de entrada y salida del tanque de tormenta 4.	106
Tabla 30 Cálculo de volúmenes de entrada y salida del tanque de tormenta 5.	107
Tabla 31 Costos de tuberías sin la implementación de tanques de tormenta.	109
Tabla 32 Costos de Pozos sin la implementación de tanques de tormenta.	115
Tabla 33 Costos de tuberías proyectadas con la implementación de tanques de tormenta.	120
Tabla 34 Costos de pozos con la implementación de los tanques de tormenta en la modelación.	126

CONTENIDO DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Hidrograma de entrada al tanque de tormenta.	97
Gráfica 2 Diseño tubería de salida del tanque.	98
Gráfica 3 Hidrograma de entrada y salida del tanque de tormenta 1.	100
Gráfica 4 Hidrograma de entrada y salida del tanque de tormenta 2.	104
Gráfica 5 Hidrograma de entrada y salida del tanque de tormenta 3.	105
Gráfica 6 Hidrograma de entrada y salida del tanque de tormenta 4.	106
Gráfica 7 Hidrograma de entrada y salida del tanque de tormenta 5.	107

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento y expansión poblacional es uno de los problemas que atraviesan las ciudades principales y más desarrolladas, lo cual conlleva a complicaciones que comprometen el bienestar de los habitantes. El incremento demográfico implica directamente alteraciones en el ciclo hidrológico y el aumento de explotación de recursos naturales, así como fuentes de contaminantes, siendo la sobreexplotación de ecosistemas, extracción del agua y contaminantes atmosféricos algunos de los principales problemas ambientales (Gómez Páez et al., n.d.).

Las alteraciones del ciclo hidrológico contribuyen a fenómenos destructivos como lo son las inundaciones, las cuales se producen por lluvias persistentes y generalizadas que causan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas.(IDEAM-Instituto de Hidrología, n.d.) Así mismo, al tener un constante crecimiento en las ciudades, se han reducido las áreas verdes que las rodeaban, incrementando de esta forma las superficies impermeables, lo cual genera problemas con el drenaje y la disposición de las aguas lluvias.

Bajo este escenario, se hace importante realizar una intervención efectiva y asertiva, para mejorar la seguridad y evitar pérdidas económicas en las ciudades. La implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenibles (SUDS) permiten y pretenden imitar los procesos hidrológicos en el desarrollo urbanístico, controlando la escorrentía en el paisaje urbano, siendo una alternativa no convencional que integra aspectos ambientales, económicos, sociales, hidrología y urbanismo, para lo cual se proponen diferentes topologías y técnicas que permiten controlar y atenuar los picos de crecientes.

El proyecto propuesto, tiene como objeto desarrollar una alternativa no convencional como los SUDS, para la gestión y control de aguas lluvias. La planificación y selección de los sistemas urbanos de drenaje sostenible requieren voluntad para cambiar las cosas e interés en la integración medioambiental de los sistemas de drenaje empleados. El criterio de diseño debe equilibrar las componentes relacionadas con la cantidad de agua, su calidad y el servicio ofrecido. La metodología de análisis se realizó sobre el casco urbano de la ciudad de San José de Cucutá, Norte de Santander, frente al centro comercial Unicentro, zona donde se presentan grandes inundaciones.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Analizar los beneficios de la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible (SUDS) en la cuenca delimitada al noroeste por la avenida 4 entre la calle 16 Norte a la calle 23 Norte y al sureste por la calle 9A Norte entre la avenida Guaimaral y la avenida Libertadores de la ciudad de San José de Cúcuta, Norte de Santander, para el control y regulación de aguas lluvias, teniendo en cuenta las condiciones propias del lugar.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar el diagnóstico de la infraestructura existente, para identificar las falencias del diseño actual.
- Recopilar información hidrológica de la zona de estudio, para definir el hietograma de diseño y los caudales máximos.
- Analizar y revisar cuáles de los diferentes tipos de SUDS, son útiles para implementar en el caso de estudio, mediante una matriz multicriterio para definir cuál es la mejor alternativa a implementar.
- Proponer alternativas de solución, integrando al sistema de alcantarillado actual los SUDS, todo esto teniendo en cuenta la normatividad vigente.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Generalidades de los SUDS

Las actividades humanas generan, tanto en la atmósfera como en la superficie de las cuencas urbanas, una amplia gama de contaminantes y durante los eventos de precipitación, la contaminación acumulada en la superficie es conducida hacia la red de colectores. El aumento de la impermeabilidad redonda en una reducción de la infiltración, como consecuencia de todo ello, se generan volúmenes de escorrentía netamente mayores y, además, se aceleran los tiempos de respuesta, por lo que aumenta el riesgo de inundaciones. Bajo esta perspectiva, surge la necesidad de afrontar la gestión de las aguas pluviales desde una perspectiva diferente a la convencional, que combine aspectos hidrológicos, medioambientales y sociales, denominado como Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), también conocidos como BMP's (Best Management Practices) o WSUD (Water Sensitive Urban Design), entre otras acepciones. (PERALES MOMPALER et al., n.d.)

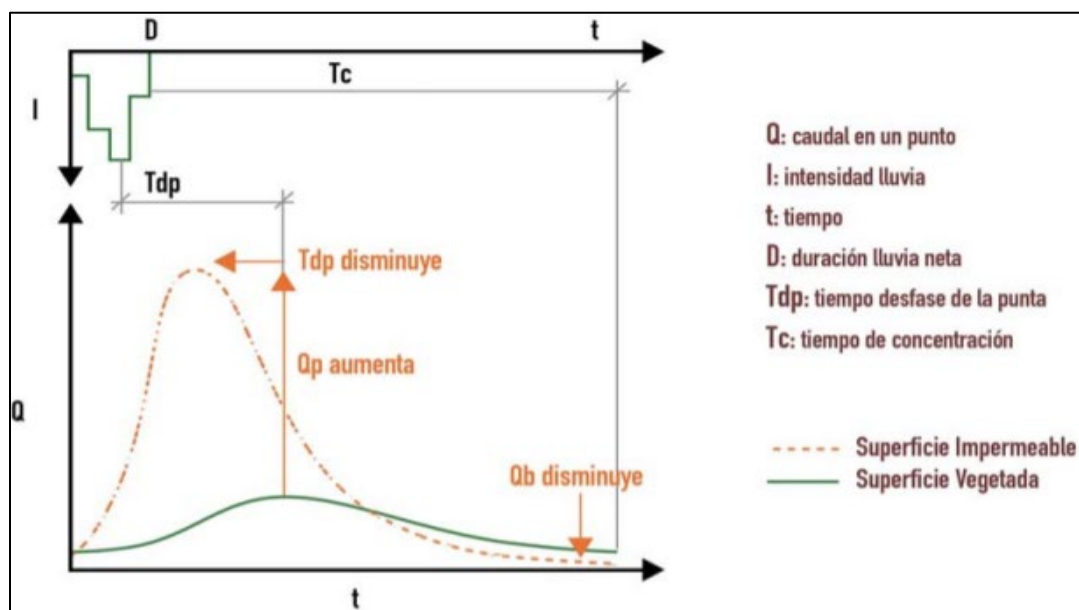


Ilustración 1 Cambios inducidos por el desarrollo urbano en la transformación lluvia-escorrentía.

Fuente: Los SUDS: una alternativa a la gestión del Agua lluvia. Perales & Doménech.

El objetivo principal en la implementación de los SUDS es reducir la escorrentía superficial minimizando las superficies impermeables de la ciudad y dividir las cuencas vertientes para evitar la concentración de grandes volúmenes de agua en un punto, obteniendo de este modo un doble beneficio al disminuir la cantidad de escorrentía y ahorrar un consumo de agua potable (Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas – DICTUC & Ministerio de vivienda y urbanismo (MINVU), 1996).

De acuerdo con las guías de diseño y con los estudios realizados, se adoptan las siguientes tipologías de SUDS:

- **Cubiertas Vegetadas:** Sistemas multicapa con cubierta vegetal que recubren tejados y terrazas de todo tipo. Están concebidas para interceptar y retener las aguas pluviales, reduciendo el volumen de escorrentía y atenuando el caudal pico.
- **Superficies Permeables:** Pavimentos que permiten el paso del agua a su través, abriendo la posibilidad a que ésta se infiltre en el terreno o bien sea captada y retenida en capas subsuperficiales para su posterior reutilización o evacuación.
- **Pozos y zanjas de infiltración:** Pozos y zanjas poco profundos (1 a 3 m) rellenos de material drenante (granular o sintético), a los que vierte escorrentía de superficies impermeables contiguas.
- **Cunetas Verdes:** Estructuras lineales vegetadas de base ancha ($> 0,5$ m) y talud tendido ($< 1V:3H$) diseñadas para almacenar y transportar superficialmente la escorrentía.
- **Estanques de retención:** Lagunas artificiales con lámina permanente de agua (de profundidad entre 1,2 y 2 m) con vegetación acuática, tanto emergente como sumergida. Están diseñadas para garantizar largos periodos de retención de la escorrentía (2-3 semanas).
- **Humedales Artificiales:** Similares a los anteriores, pero de menor profundidad y con mayor densidad de vegetación emergente. Aportan un gran potencial ecológico, estético, educacional y recreativo.

3.2 Estado del Arte

Investigaciones recientes, resaltan y muestran la importancia de utilizar estas alternativas no convencionales, para el caso de estudio en la localidad de Fontibón en la ciudad de Bogotá, específicamente en el sector ubicado sobre las calles 13 y 17, entre la Av. Ciudad de Cali y la carrera 96B, con un área aproximada de estudio de 6.2 Ha, entre los cursos de agua más importantes que se encuentran en inmediaciones de la zona del proyecto se encuentran el Río Fucha y en Canal Cundinamarca. Se implementaron pozos/ zanjas de infiltración y tras realizar la modelación hidráulica e hidrológica, se obtuvo como resultado que este tipo de controles permite aminorar los picos de las tormentas o eventos máximos que se presenten, evitando fenómenos de inundación y además funciona de manera combinada con los sistemas de drenaje convencionales y permite, al mismo tiempo mejorar la calidad de agua de los vertidos de las redes de alcantarillado pluvial a los cuerpos de agua existentes. Así mismo, se pudo determinar que el uso de SUDS en combinación con los sistemas de drenaje urbano convencionales, permite disminuir el caudal aportado en todo el sistema, lo cual se refleja en una disminución de diámetros y de pendientes en la red planteada, logrando reducir los costos de todo el sistema proyectado (Cubides & Santos, 2018).

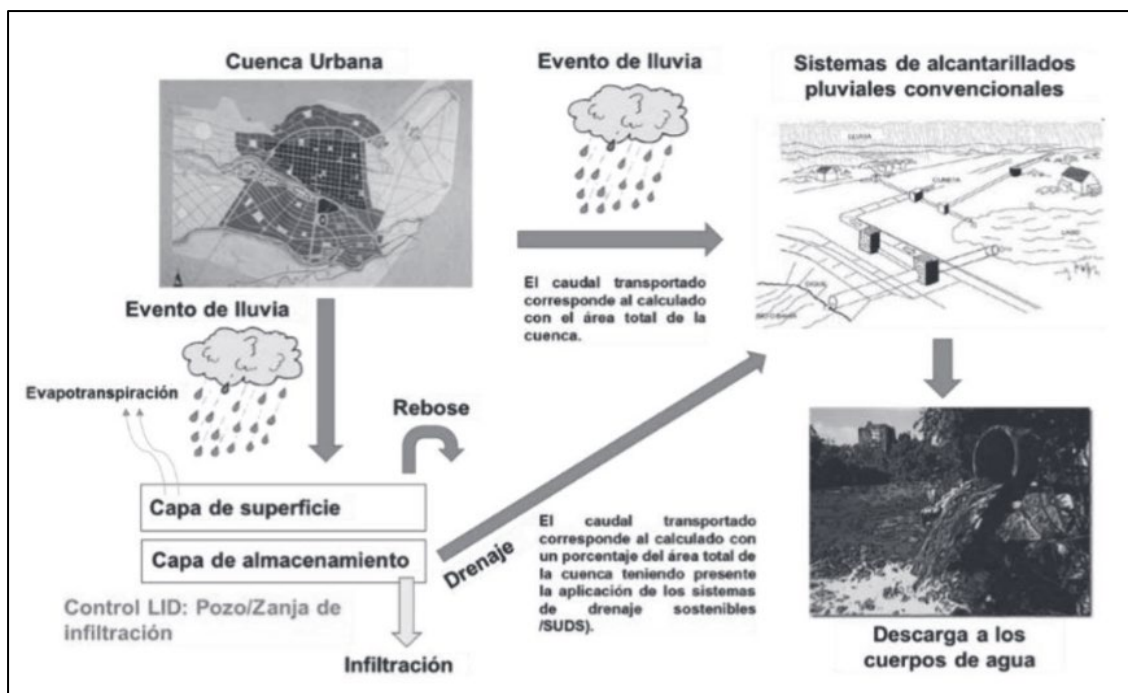


Ilustración 2 Cadena de gestión de escorrentía de los sistemas de alcantarillado convencionales vs la aplicación de los sistemas SUDS (pozos/zanjas de infiltración).

Fuente: Control de escorrentías urbanas mediante SUDS. Cubides & Santos, 2018.

Otro caso particular fue el de analizar la viabilidad de la implementación de SUDS en cuencas urbanas de uso residencial en la ciudad de Bogotá, en el cual, a partir de la investigación, se concluye que los SUDS, son una muy buena alternativa para encontrar el equilibrio entre optimizar un recurso y darle un segundo uso al mismo, para generar un ahorro de este, el cual se refleja en una disminución en costos. El costo de las zanjas de infiltración y un sistema de drenaje compuesto por un filtro en forma de espina de pescado, tienen un costo relativamente similar, por lo que cada constructor determinará qué tipo de sistema le es más eficiente según su criterio ya que la funcionalidad hidráulica es la misma. Este tipo de sistemas es una manera propicia para amortiguar los picos de entrada al sistema pluvial y optimizar en el diseño, y así mismo ayudar al medio ambiente al mejorar la calidad de agua producida por la escorrentía, reduciendo de la cantidad de contaminantes que llegan al medio receptor. (GÓMEZ VALENZUELA CHRISTIAN MATEO & SANGUINO LÓPEZ SERGIO ANDRÉS, 2019).

Por otra parte, se encuentra el proyecto de la avenida El Tintal, la cual hace parte de un megaproyecto vial en el sur occidente de la ciudad de Bogotá, sobre las localidades de Bosa y Kennedy, con un recorrido de 13 kilómetros, el cual contempla la construcción de tres carriles por sentido que permitirá el acceso a este sector de la ciudad, debido a que no hay vías principales de acceso, por lo que se propuso la implantación de sistemas alternativos de drenaje pluvial urbano en este proyecto, para este caso y de acuerdo con las características de la zona, las tipologías aplicables son Alcorques inundables, cunetas

verdes, zanjas de infiltración, zonas de biorretención y tanques de almacenamiento, considerados como elementos complementarios al sistema de drenaje convencional para garantizar la viabilidad del proyecto. Se pudo evidenciar además que la reducción de escorrentía a una condición natural o de predesarrollo, se logra en un 5,85 % de las áreas aferentes a la avenida Tintal. El 10,22 % de las áreas de drenaje, tienen una reducción de escorrentía superficial del 25 %. Un diseño urbanístico, de tránsito y geométrico en forma de corredor verde, permitiría una eficiente implantación de SUDS, lo cual podría generar un ahorro de hasta 1.212 millones de pesos para un proyecto como el de la avenida Tintal.(Hernández Rodríguez John Wilson, 2020)

Para el Municipio de Palmira, Valle del Cauca, se realizó una investigación para la implementación de SUDS, esto debido a que había zonas donde se presentaban inundaciones. La ciudad de Palmira presenta al interior del perímetro urbano un porcentaje importante de áreas y vacíos urbanos destinados al desarrollo de diversos proyectos urbanísticos. En este contexto se seleccionó un proyecto destinado a la construcción de vivienda justificando la necesidad de realizar un manejo y control de las escorrentías por la limitada capacidad de la infraestructura existente y la magnitud de las obras necesarias en caso de una alternativa tradicional. Se utilizó un estanque de detención y se encontró que el comportamiento del sistema permite evitar los problemas de inundaciones para un periodo de retorno de 25 años, evidenciando de esta forma el adecuado funcionamiento del sistema. Sin embargo, en el estudio se recomienda que se deben realizar investigaciones que incluyan la revisión de casos y experiencias internacionales, adaptándolas al contexto nacional, debido a que los criterios de diseño por parte de las distintas entidades ambientales y territoriales se ven influenciadas por el conocimiento y experiencia que se tenga sobre el tema. (MARTÍNEZ CANDELO GEINNER, 2013)

Cabe resaltar también la implementación de los SUDS como alternativa de regulación y control de inundaciones en el Municipio de Nechí, localizado en la subregión del Bajo Cauca del departamento de Antioquia y de la subregión de la Mojana. Es una población que por su ubicación se caracteriza por ser la zona de “escurridero” ya que tres ríos importantes como lo son Cauca, San Jorge y Magdalena, se unen en este tramo, anexo a esto es un municipio que cuenta con precipitaciones constantes y fuertes en todo el transcurso del año. La unión de estos factores hace que sea una zona de alta vulnerabilidad con respecto a las inundaciones. El estudio realizado presenta una alternativa de mitigación a esta problemática por medio de la implementación de depósitos de infiltración y zanjas filtrantes las cuales serían instaladas en la periferia de la zona, de esta forma las aguas lluvias se canalizarían a estos pozos y se almacenarían de forma controlada, pero inicialmente el estudio recomienda que se deben instaurar medidas de educación y concientización sobre este tipo de alternativas, para que tengan mayor aprovechamiento y funcionen de una manera adecuada. (MUÑOZ RODRIGUEZ JUAN PABLO & ACUÑA ZAIDA ESPERANZA, 2015)

La normatividad y aplicaciones en el ámbito internacional permiten identificar diferentes estrategias acogidas en otros países para el control de la escorrentía superficial en las ciudades. En Polonia, la universidad tecnológica de Rzeszow, el departamento de

Infraestructuras y Gestión del Agua, se desarrolló un proyecto el cual consistía en implementar un canal de retención de aguas residuales como red de saneamiento y depósito de acumulación, una alternativa a la instalación de depósitos más económica, utilizar la red de alcantarillado como una unidad de almacenamiento aprovechando todos sus componentes para almacenar temporalmente el agua, para esto diseñó un canal de retención con particiones interiores en forma de cámaras con una apertura en el fondo del canal, transformando la red en un canal de retención, garantizando de esta forma un buen funcionamiento en el sistema. (Dziopak Józef, 2018).

La Agencia de Protección Ambiental (EPA), en Estados Unidos, tiene la responsabilidad de mantener y hacer cumplir los estándares nacionales bajo una variedad de leyes ambientales, en consulta con los gobiernos estatales y locales. El desarrollo de bajo impacto es un enfoque de gestión y estrategias que pueden reducir la escorrentía y las cargas contaminantes, incluye prácticas con enfoques generales y globales de diseño del sitio y prácticas individuales de gestión de las aguas pluviales a pequeña escala, que promueven el uso de los sistemas naturales para la infiltración, la evapotranspiración y la recolección y uso de agua lluvia (Epa & of Wetlands, 2012).

En España, la mayoría de las metodologías desarrolladas se basan en la obtención de ratios de almacenamiento a partir de la simulación continua de series históricas de precipitación, siendo los resultados bastante dispares en función del objetivo medioambiental fijado. se desarrolló el proyecto de Rehabilitación de redes de drenaje urbano mediante utilizando un algoritmo genético multiobjeto, en este trabajo se recalca la importancia de mejorar el esfuerzo computacional en el proceso de optimización y en su investigación, se concluye que la acción combinada de instalar tanques de tormenta y la renovación de tuberías es mucho más efectiva que la intervención por separado de estas dos técnicas. En los resultados de su estudio en el que usan un algoritmo pseudo genético se determina que los controles hidráulicos se presentan como una técnica para mejorar la eficiencia del sistema al permitir la acumulación de agua en ciertos puntos de la red, lo que disminuye el tiempo de concentración aguas abajo y, por lo tanto, las inundaciones (Ngamalieu-Nengoue et al., 2019).

3.3 Requisitos exigidos en la normatividad

3.3.1 Resolución 0799 de 2021

Esta resolución reglamenta todos los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de planeación, diseño y construcción de los proyectos para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico y es expedida por el Ministerio de Vivienda Ciudad y territorio (MVCT).

El artículo 44, por el cual se modifica el artículo 153 de la resolución 0330 de 2017, establece que, para nuevos desarrollos urbanos, donde se modifique la cobertura del suelo, se deben generar estrategias con el fin de mitigar el efecto de impermeabilización de las áreas. Para ello se deben diseñar SUDS, analizando las

diferentes tipologías susceptibles de implementación y su objetivo principal será reducir mínimo en un 30 % el caudal pico del hidrograma de creciente de diseño.

Cuando se utilicen estructuras de retención, se deben implementar sistemas de cribado y sedimentación, prever la facilidad del mantenimiento manual o mecánico, y la accesibilidad y medios para transportar los desechos a los sitios finales de disposición, de acuerdo con su composición y la normatividad vigente (Ministerio de Vivienda, 2021)

3.3.2 Ministerio de Ambiente y desarrollo Sostenible

El objetivo de la Política Nacional de Cambio Climático es promover una gestión del cambio climático que contribuya a avanzar en una senda de desarrollo resiliente al clima y baja en carbono, que reduzca los riesgos asociados a las alteraciones por efectos del cambio climático.

Por otra parte, está la Política Nacional para Gestión Integral del Recurso Hídrico, la cual tiene como objetivo principal “Garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante una gestión y un uso eficiente y eficaz, articulados al ordenamiento y uso del territorio y a la conservación de los ecosistemas que regulan la oferta hídrica, considerando el agua como factor de desarrollo económico y de bienestar social, e implementando procesos de participación equitativa e incluyente” (Colombia. Ministerio de Ambiente, 2010).

Garantizando de esta forma promover y desarrollar la participación comunitaria en actividades y programas de protección ambiental, de desarrollo sostenible y de manejo adecuado de los recursos naturales renovables.

3.3.3 Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP)

La EAAB, en compañía del Centro de investigaciones en ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes (CIIA), desarrollo la guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de drenaje Sostenible (SUDS) y con ello la norma NS-166, donde se establecen los aspectos a considerar para realizar el diseño de SUDS en el espacio público y que son complementarios al sistema de drenaje urbano convencional para retención de volumen y calidad de agua y adicional se establecen criterios de diseño de estructuras anexas a estas tipologías.

Se deben tener en cuenta los criterios de diseño, que corresponden al conjunto de condiciones establecidas y aprobadas por parte del constructor, diseñadores y autoridades competentes. Para áreas urbanizadas dichas condiciones van relacionadas con la cantidad y calidad de agua (Centro de investigación de Ingeniería Ambiental Universidad de los Andes, 2016).

Con el objetivo de encontrar la tipología que más se ajuste a la zona, es necesario tener en cuenta toda la información correspondiente a las variables que condicionan la misma. De esta manera se identificará, con mayor facilidad, qué tipologías se ajustan mejor a estas características particulares. Ahora bien, para filtrar aún más y

encontrar la tipología que mejor se ajuste, el siguiente paso es seleccionar aquellas tipologías cuya función se encuentra alienada con los objetivos planteados (Centro de investigación de Ingeniería Ambiental Universidad de los Andes, 2016).

A partir de la investigación llevada a cabo en la guía (Centro de investigación de Ingeniería Ambiental Universidad de los Andes, 2016), se determinaron las siete tipologías de SUDS más factibles a implementar en el caso particular de la ciudad de Bogotá. Estas, en orden de aplicabilidad, son:

- Alcorques inundables.
- Tanques de almacenamiento.
- Zonas de bioretención.
- Cunetas verdes.
- Cuencas secas de drenaje extendida.
- Zanjas de infiltración.
- Pavimentos porosos.

Para el desarrollo de este trabajo nos enfocaremos en una de estas siete metodologías, dada su previa evaluación de viabilidad para las características específicas de la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta las restricciones y beneficios específicos que cada una de estas acarrea (Centro de investigación de Ingeniería Ambiental Universidad de los Andes, 2016).

3.3.4 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Los objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fueron adoptados por las Naciones Unidas en 2015, con el objetivo de poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad.

Los 17 ODS están integrados: reconocen que la acción en un área afectará los resultados en otras áreas y que el desarrollo debe equilibrar la sostenibilidad social, económica y ambiental. Incluyen desde la eliminación de la pobreza hasta el combate al cambio climático, la educación, la igualdad de la mujer y la defensa del medio ambiente (Naciones Unidas, 2023).

3.3.4.1 Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento

Este objetivo, busca garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. Existen miles de millones de personas que aún carecen de estos servicios básicos. En todo el mundo, una de cada tres personas no tiene acceso a agua potable salubre, dos de cada cinco personas no disponen de una instalación básica destinada a lavarse las manos con agua y jabón, y más de 673 millones de personas aún defecan al aire libre. Más del 80% de las aguas residuales resultantes de actividades humanas se vierten en los ríos o el mar sin ningún tratamiento, lo que provoca su contaminación. Las inundaciones y otros desastres relacionados con el agua representan el 70% de todas las muertes relacionadas con desastres naturales. Teniendo en cuenta lo anterior, se busca

proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua y además apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento (Naciones Unidas, 2023).

3.3.4.2 Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles

Este ODS, busca lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. Las ciudades y las áreas metropolitanas son centros neurálgicos del crecimiento económico, ya que contribuyen al 60 % aproximadamente del PIB mundial. Sin embargo, también representan alrededor del 70 % de las emisiones de carbono mundiales y más del 60 % del uso de recursos. Las ciudades del mundo ocupan solo el 3% de la tierra, pero representan entre el 60% y el 80% del consumo de energía y el 75% de las emisiones de carbono. Por lo anterior, una de las metas del objetivo es de aquí a 2030, aumentar la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos en todos los países y reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo (Naciones Unidas, 2023).

3.4 Modelación en PCSWMM

El software PCSWMM, es un programa de modelado avanzado para aguas pluviales, aguas residuales, cuencas hidrográficas y sistemas de distribución de agua.

Las ventajas que tiene el software, es para mejorar el diseño de suministro de agua, drenaje e infraestructura verde, mitigación de desbordamiento de alcantarillado, calidad de agua, análisis integrado de cuencas, modelado 1D-2D. Las aplicaciones más comunes del software son:

- Diseño de desarrollo de bajo impacto, es decir, evaluar la eficacia del desarrollo de bajo impacto (LID), la infraestructura verde y otras mejores prácticas de gestión para reducir las cargas contaminantes del clima húmedo.
- Modelado integrado de captación / cuenca hidrográfica
- Modelo de la calidad del agua
- Diseño de estanque de detención, se puede determinar fácilmente el tamaño y la configuración de los estanques de detención efectivos y sus accesorios para el control de inundaciones y la protección de la calidad del agua.
- Diseño de sistema de drenaje dual
- Diseño de sistema de alcantarillado sanitario
- Gestión de aguas pluviales y remediación de alcantarillado
- Pronóstico de inundaciones
- Manejo de llanuras aluviales y análisis de riesgos
- Simulación dinámica de tormentas

3.5 Modelación en SewerGems

SewerGEMS, es un programa que sirve como herramienta para la simulación de sistemas de alcantarillado incluyendo sus componentes como pozos de mantenimiento, descargas, aliviaderos, coberturas, quebradas, tuberías, entre otros.

Esta herramienta, permite modelar de manera conjunta o separada redes de aguas de lluvias, aguas residuales y combinados de forma que podamos realizar, Análisis hidráulico y Diseño de redes.

Es un software que cuenta con herramientas de ingeniería avanzadas para planificar, diseñar, mantener y operar sistemas de alcantarillado y combinados. Con SewerGEMS es posible analizar sistemas de alcantarillado urbanos utilizando herramientas hidráulicas e hidrológicas incorporadas, y una gran variedad de métodos de calibración de modelos lluvia-escorrentía.

A continuación, se describen las propiedades principales:

- Asignar y calcular las cargas sanitarias, use el módulo LoadBuilder para aprovechar el consumo, el monitoreo del flujo, el uso del suelo o los datos del censo en su SIG para estimar e importar automáticamente las cargas sanitarias para el modelo de alcantarillado.
- Asignar y estimar las cargas de aguas residuales, cargue modelos con flujos de escorrentía de clima húmedo derivados de la precipitación utilizando las distribuciones de lluvia incorporadas o los eventos de lluvia definidos por el usuario.
- Analizar el sistema hidráulico y el derrame de aguas negras combinados.
- Analizar la formación de sulfuro de hidrógeno, identifique las áreas de su red que corren el riesgo de sufrir daños por la formación de sulfuro de hidrógeno (H₂S).
- Calcular la proporción de escorrentía de aguas pluviales que entrará en una entrada versus la proporción que se llevará río abajo en una canaleta o estanque en la superficie de una carretera.
- Construir y gestionar modelos hidráulicos
- Diseñar y analizar alcantarillas.
- Diseñar y analizar los controles de desarrollo de bajo impacto.
- Diseñar y analizar estanques y salidas.
- Diseño de sistemas de aguas pluviales.
- Simular la calidad del agua.

4. METODOLOGÍA

4.1 Descripción del problema

En el casco urbano de la ciudad de San José de Cúcuta, Norte de Santander, se presenta este fenómeno de inundaciones por origen pluvial desde hace varios años, y de acuerdo con la secretaria de gestión del riesgo de desastres de la ciudad de Cúcuta, expresan que, las situaciones que más se presentan son inundaciones, colapsos estructurales, caída de árboles y rocas y desbordamiento de canales de aguas lluvias y fuentes hídricas. La amortiguación de aguas lluvias se vuelve cada vez más complicado debido a que el rápido desarrollo urbano ha generado gran impermeabilización de los suelos, dejando muy pocas coberturas vegetales que ayuden a interceptar el agua lluvia.



Ilustración 3 Inundaciones presentadas en el Nororiente de la Ciudad de Cúcuta.
Fuente: Fotografía Periódico El Tiempo, abril 2021. (<https://www.eltiempo.com>)

Estas inundaciones se han tratado de solucionar a lo largo de los años incrementando la capacidad de las redes de drenaje, sin embargo, es una solución que genera altos costos en su implementación, además de incrementar el riesgo potencial de inundación al reducir los procesos de evapotranspiración e infiltración.



Ilustración 4 Inundaciones en el sector de la Universidad Francisco de Paula Santander y el Colegio el Inem.

Fuente: Tomado de:

https://caracol.com.co/emisora/2019/01/29/cucuta/1548768646_183093.html

El área de estudio está formada por los barrios Ciudad Jardín, Gratamira, Guaimaral, Zulima, Santa Helena, Prados del Norte, Tasajero y Niza, es delimitada al noroeste por la avenida 4 entre la calle 16 Norte a la calle 23 Norte y al sureste por la calle 9A Norte entre la avenida Guaimaral y la avenida Libertadores, con una extensión superficial de 131 Hectáreas.

Este sector es densamente poblado con un nivel de urbanización aproximadamente del 83.5% y se caracteriza por actividades de uso de suelo residencial, comercial e industrial, destacándose el centro comercial Unicentro, el Concesionario Ford y el Looping Park Cúcuta, entre otros.

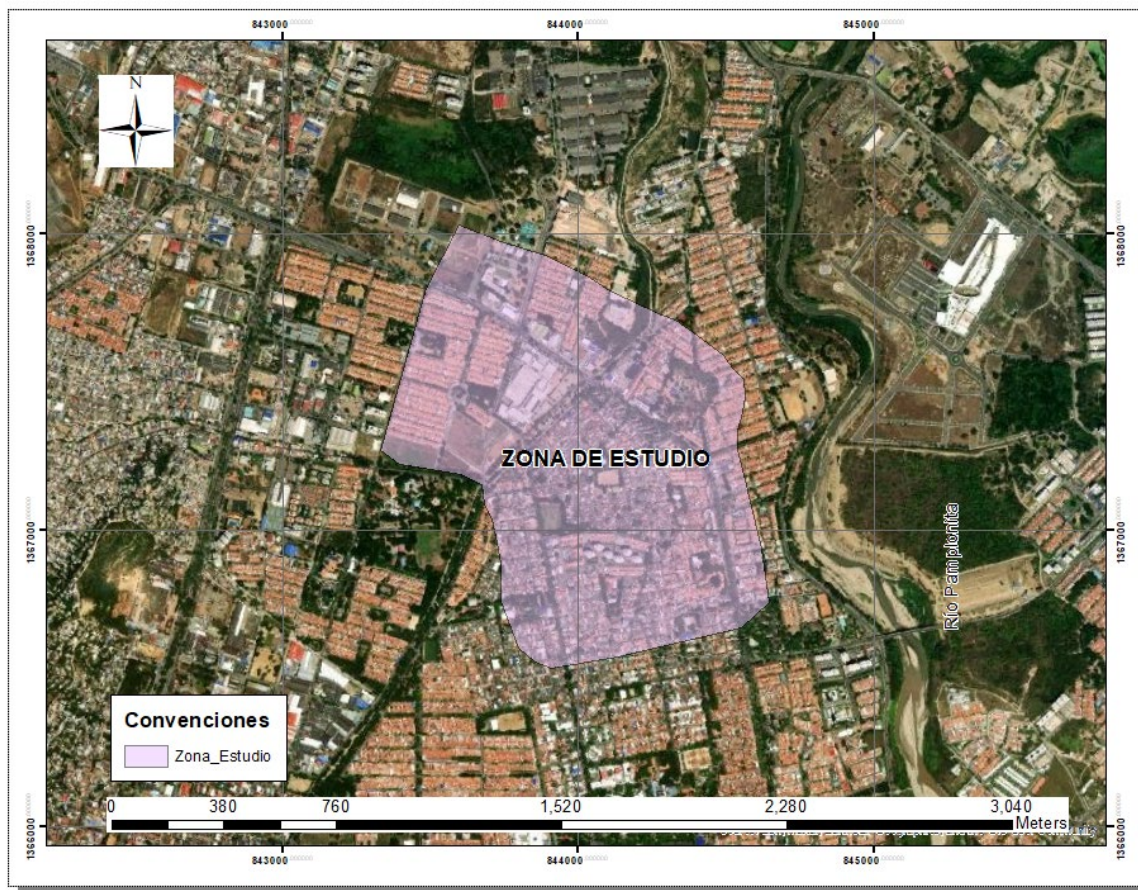


Ilustración 5 Zona de Estudio.

Fuente: Elaboración propia

Un claro ejemplo de inundación es la zona de estudio, ubicada al noreste de la ciudad de Cúcuta, frente al centro comercial Unicentro, entre las coordenadas $7^{\circ}55'17.19''$ N y $72^{\circ}30'3.22''$ W. Esto se debe a que la cuenca del canal Bogotá, se encuentra altamente urbanizada, lo que da como resultado tiempos de concentración cortos y un aumento del caudal de escorrentía superficial.

Además, el agua lluvia que llega por las calles entre la avenida Guaimaral y la calle libertadores frente al canal Bogotá, no ingresa al canal, sino que cambia su dirección hacia el parque Guaimaral. En este punto, parte del agua acumulada es captada por una rejilla y lo demás pasa a la avenida libertadores, hasta la zona de estudio, formando en su momento grandes inundaciones.

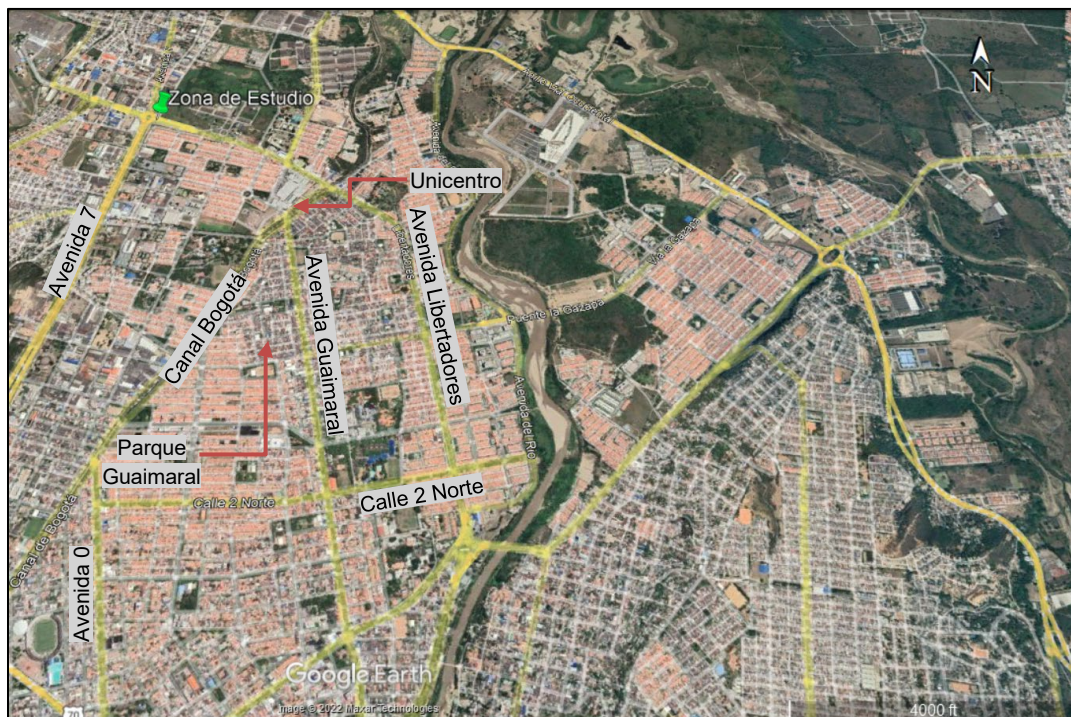


Ilustración 6 Zona de estudio.
Fuente: Google Earth, 2022.



Ilustración 7 Zona de inundación.
Fuente: Google Earth, 2022.

En ese mismo sentido, existe también el caudal de aguas lluvias proveniente de la avenida cero, que llega a la avenida libertadores mediante la calle 2 Norte, y desde ese punto, el agua se desplaza hasta llegar a la zona de estudio. Cabe resaltar, que la avenida libertadores cuenta con rejillas laterales, sin embargo, por problemas en su diseño son insuficientes hoy en día, provocando inundaciones con niveles de hasta 70 cm.

Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo de tesis tiene como objeto desarrollar una alternativa no convencional como los SUDS, para la gestión y control de aguas lluvias. Esto se aplica a través de estructuras o tipologías diseñadas en un sitio apropiado para reducir los efectos de inundaciones por medio de la retención del agua de escorrentía, promover la infiltración, mejorar la calidad del agua que le llega a los cuerpos receptores, incentivar el reúso de agua y generar paisajismo (Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental CIAA & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá., 2016)

La planificación y selección de los sistemas urbanos de drenaje sostenible requieren voluntad para cambiar las cosas e interés en la integración medioambiental de los sistemas de drenaje empleados. El criterio de diseño debe equilibrar las componentes relacionadas con la cantidad de agua, su calidad y el servicio ofrecido. Así, deben tenerse claras desde el inicio un conjunto de características exigibles.

En los sistemas de drenaje urbano convencionales la calidad del agua de escorrentía no se ha tenido en cuenta durante mucho tiempo. En cambio, para los sistemas urbanos de drenaje sostenible es uno de los tres objetivos básicos junto a la cantidad y el servicio prestado (Castro Fresno et al., 2005). Para su correcta planificación y desarrollo se tendrá en cuenta el reglamento técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT), la resolución 0799 de 2021, junto con la guía técnica de diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenibles de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), toda vez que, en la ciudad de Cúcuta, no se cuenta con una normatividad técnica para la zona de estudio.

4.2 Generalidades del Municipio

El municipio tiene un área total de aproximadamente 1117 km², limita al norte con Tibú y el municipio venezolano de Catatumbo, al noroccidente con Tibú y Sardinata, al occidente con El Zulia, al suroccidente con San Cayetano, al sur con Villa del Rosario, Los Patios y Bochalema, al suroriente y oriente con los municipios venezolanos de San Antonio del Táchira y Ureña respectivamente, y al oriente con Puerto Santander.

4.2.1 Hidrología

Sus principales fuentes hidrográficas son el río Pamplonita, el río Táchira y el río Zulia, siendo el primero el más importante del municipio, con una longitud de 147 km y un área de 80.000 ha, recorriendo un espacio urbano de más de 9 km y una cuenca municipal de 31.909,64 ha.

4.2.2 Geología

El territorio de Cúcuta es llano hacia el norte, y montañoso en su parte central y en sus límites al sur, en donde presenta varios cuerpos montañosos desprendidos de la cordillera Oriental de los Andes Colombianos, como la serranía de Las Campanas o la cordillera de Altoviento. La ciudad, por su parte, está situada en el valle homónimo, al pie de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, a una altitud media de 320 msnm, en la frontera con Venezuela.

El lugar más alto es el corregimiento de Ricaurte (área 0,4 km²) a unos 41 km del centro de la ciudad, fundado por el sacerdote Demetrio Mendoza en 1921 con el nombre de Mucujún, cuya temperatura ronda entre los 10 y 17 °C, y se encuentra a 1666 msnm. El lugar más alejado y bajo es el corregimiento de La Punta ubicado a 67 km del centro de la ciudad, a 80 msnm. Uno de sus puntos más emblemáticos es la cima del Cerro Tasajero (de la voz indígena que significa "cerro sagrado") a 987 msnm, el cerro se encuentra cubierto por un bosque seco tropical que alberga varias familias de flora como las leguminosas y animales pequeños como roedores, las cuales se ven amenazadas por la explotación minera

4.2.3 Clima

Según la clasificación climática de Köppen la ciudad se encuentra en una zona de transición entre el clima tropical de sabana con verano seco As y el semiárido cálido tropical BShx. La temperatura del municipio de Cúcuta está determinada por los pisos térmicos que van del frío, pasando por el templado hasta llegar al cálido, en donde está la zona urbana, la cual tiene una temperatura media de 27.6 °C. Las temperaturas más altas oscilan entre 35 y 38 °C y las más bajas oscilan entre 17 y 20 °C. La precipitación media anual es baja-moderada: 622 mm. La temporada de vientos ocurre entre junio y septiembre, con rachas que superan los 70 km/h

4.3 Recopilación y Análisis de la información

El proceso de recopilación y de análisis de información existente es de vital importancia para el desarrollo del proyecto debido a que permite tener un panorama amplio y previo de las condiciones actuales del municipio en términos de la prestación del servicio requerido, de las expectativas y proyecciones que tiene pensado el municipio a futuro, de las condiciones físicas (topográficas, geológicas, hidrológicas, climatológicas, etc.) del área de estudio que permiten identificar los problemáticas que puedan presentarse, los factores socioeconómicos que pueden alterar a futuro la prestación del servicio, entre otros factores que permitirán aterrizar

las bases del diagnóstico requerido y determinar las problemáticas primordiales a resolver durante la etapa de diseño. A continuación, se realiza la descripción del proceso realizado y el análisis de la información encontrada.

4.3.1 Información Preliminar e identificación de zonas permeables

De acuerdo con la información extraída del trabajo de grado de cuantificación de la peligrosidad por inundaciones de origen pluvial, desarrollado en la ciudad de San José de Cúcuta, se menciona que en la calle 9ª Norte del barrio Ciudad Jardín por la existencia del canal se alcanza a recolectar gran parte del agua de escorrentía que proviene desde el colegio INEM y el barrio San Eduardo. El flujo de escorrentía que proviene aguas arriba ingresa al canal mediante dos tuberías circulares que se encuentran en la calle 9ª Norte con avenida 14. En este punto se han presentado en algunas ocasiones inundaciones ya que la capacidad de los conductos no es suficiente para evacuar el flujo que proviene de los barrios aguas arriba.

En el barrio Prados del Norte, los habitantes manifestaron que no sufrían de inundaciones cuando se presentaban precipitaciones intensas, y que el flujo transcurría normalmente por las avenidas 3 Norte y 4 Norte hasta llegar a la avenida Libertadores y Guaimaral, conduciéndolo al canal Bogotá.

En el barrio Tasajero, la comunidad expresó su preocupación por las inundaciones que sufrían cada vez que llovía intensamente, ya que parte del agua que se conduce por la avenida libertadores hacia el canal, ingresa al barrio tasajero por la avenida 1 Norte y 2 Norte conduciendo el flujo hacia las zonas más bajas, hasta llegar a los puntos de captación que permiten la salida del flujo de escorrentía en la zona mediante el drenaje existente en este lugar, el cual se encuentra en regular estado o colmatados por acumulación de basuras (Sánchez Tapiero Diego Iván, 2023).

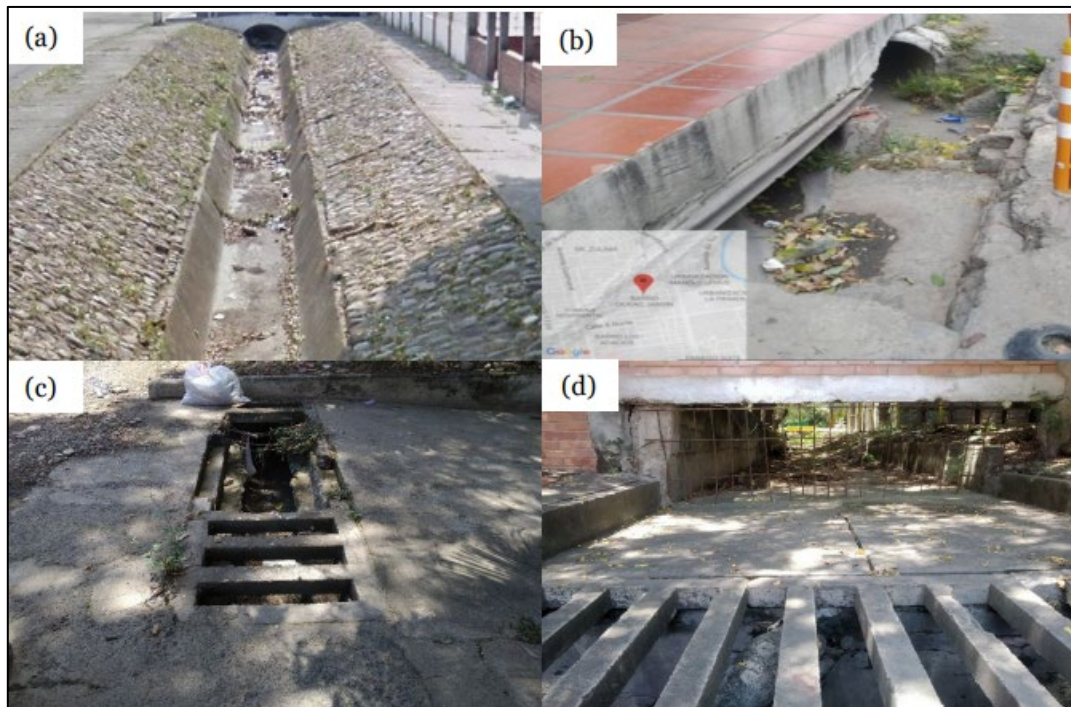


Ilustración 8 a) Canal en el barrio Ciudad Jardín. b) Captación del agua lluvia del barrio Ciudad Jardín. c) captación en el barrio tasajero. d) Canal en el barrio tasajero que conduce el agua al canal Bogotá.

Fuente: (Sánchez Tapiero Diego Iván, 2021)

El agua de lluvia proveniente del barrio Guaimaral, se conduce hacia el canal Bogotá mediante la Av. Guaimaral y la Av. 10ª Este, donde esta última entrega el flujo transportado a la Av. Guaimaral en la calle 15 Norte, de esta forma toda el agua de lluvia se acumula hasta llegar a la calle 20 Norte frente al canal. En este punto, mediante una rejilla se capta parte del flujo acumulado y el restante es dirigido a la Av. Libertadores, específicamente en el puente frente al centro comercial Unicentro, produciendo en la mayoría de los casos inundaciones en el sector. Así mismo, la comunidad de este sector expresó que las inundaciones presentadas se dan por la acumulación del flujo de escorrentía de la Av. Guaimaral y Libertadores que la conduce hasta esta zona, y no por el desbordamiento del canal cuando transporta grandes cantidades de agua de lluvia (Sánchez Tapiero Diego Iván, 2023).

4.4 Análisis Hidrológico

En el análisis hidrológico, debe contemplarse el análisis de lluvia, la metodología para el cálculo de caudales máximos y la metodología para el cálculo de hietogramas de diseño.

Para realizar el análisis de lluvia para el caso de drenaje urbano, es necesario caracterizar y recopilar información de la zona de estudio siguiendo estos pasos:

- Recopilar información de estaciones hidroclimatológicas (precipitación media multianual, mensual, humedad relativa, temperatura, evaporación y brillo solar, entre otros).
- Análisis de probabilidad de ocurrencia de tormentas máximas en 24 horas ($P_{máx24horas}$).
- Elaboración de la Curva de Intensidad-Duración-Frecuencia o mapa de intensidades para determinar el valor aproximado de la precipitación de la lluvia en el sitio de interés.

Para la zona de estudio, se utilizarán los datos de la estación Aeropuerto Camilo Daza [16015010] del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) con una serie de datos desde el año 1991 al 2001.

Para la elaboración del análisis estadístico, se propone la siguiente metodología: Se hace la verificación inicial de la cantidad y calidad de la información de los datos de las estaciones pluviométricas. En la gran mayoría de casos las series tienen casillas sin datos, generalmente por la falta del operario o por problemas de operación con el equipo.

Una vez se tienen las series de datos completas, será necesario ajustarlas a diferentes distribuciones estadísticas: Gumbel, Normal, Log Normal, Pearson III, Log Pearson III. Esto con el fin de evaluar la mejor prueba estadística de los datos y su consecuente proyección para la tormenta de diseño.

Habrá que hacer, en cada caso, una prueba de bondad de ajuste para determinar la distribución con menor error en cada estación. Para tal fin se utilizó la prueba de Smirnov – Kolmogorov con un nivel de significancia del 95%.

Cuando ya se tiene un valor de las precipitaciones más probables para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años, según el mejor ajuste en cada caso, se hará una interpolación espacial generando isoyetas a lo largo y ancho del terreno analizado para generar un modelo de lluvia en toda la cuenca.

Una vez se establece el modelo de lluvia espacial, se ponderará la altura de precipitación con las áreas de las subcuencas de manera porcentual. Este proceso se hará con cada periodo de retorno.

Estos datos de precipitación ponderada serán los usados en la generación de las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para cada subcuenca. Estas curvas serán la base para crear los hietogramas de tormenta de diseño a partir de la metodología de Bloques Alternos.

4.4.1 Complemento de datos faltantes

Es muy común encontrar datos faltantes en las estaciones, en ocasiones por la ausencia o negligencia del operario o por problemas con el aparato durante determinado tiempo. Será necesario completar estos datos, ya que el análisis

hidrológico exige series continuas. Para esto se usa la ecuación (1)¹. Este método es válido siempre y cuando haya estaciones vecinas que tengan series de datos del mismo año.

$$P_x = \frac{1}{n} \left[\left(\frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left(\frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \dots + \left(\frac{N_x}{N_n} \right) P_n \right] \quad (1)$$

Donde,

n = número de estaciones pluviométricas con datos de registros continuos cercanas a la estación "x", la cual va a ser completada en su registro.

P_x = Precipitación en la estación "x" durante el periodo de tiempo por completar.

P_1 a P_n = Precipitación de las estaciones 1 a n durante el periodo de tiempo por completar.

N_1 = precipitación media anual a nivel multianual de la estación "x"

N_1 a N_n = precipitación media anual a nivel multianual de las estaciones de 1 a n

4.4.2 Parámetros estadísticos iniciales

Se tomarán las series de datos de cada estación y se buscará el valor máximo anual. Esto generará un nuevo conjunto de datos al cual se le deberá evaluar el logaritmo en base 10 de cada uno de ellos. A estos dos grupos de datos se les deberá evaluar el promedio (Ver ecuación (2)), la desviación estándar (Ver ecuación (3)) y el coeficiente de asimetría (Ver ecuación (4)).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

Donde,

\bar{X} = media o promedio de los datos

n = número de datos

X_i = variable aleatoria

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

Donde,

S = desviación estándar

n = número de datos

\bar{X} = media o promedio de los datos

X_i = variable aleatoria

$$C_a = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{S} \right)^3 \quad (4)$$

¹ Fuente: Hidrología en la Ingeniería, G. Monsalve, 1999, página 84

Donde,
 Ca = Coeficiente de asimetría
 n = número de datos
 \bar{X} = media o promedio de los datos
 X_i = variable aleatoria
 S = desviación estándar

4.4.3 Distribución de datos mensuales multianuales

La distribución de probabilidad de una variable aleatoria es una función que asigna a cada suceso definido sobre la variable la probabilidad de que dicho suceso ocurra. La distribución de probabilidad está definida sobre el conjunto de todos los sucesos, cada uno de los sucesos es de rango de valores de la variable aleatoria.²

Para el análisis de frecuencias de eventos se tienen en cuenta los siguientes supuestos:

- Los eventos hidrológicos extremos son variables aleatorias que pueden expresarse por medio de una distribución de probabilidad.
- Si la magnitud de cada suceso no tiene correlación con los sucesos anteriores, significa que la serie de valores extremos son independientes.
- La distribución de probabilidad que explica el proceso no varía en el tiempo, ni cambia de función de la magnitud de la variable.³

En este estudio se calculará la precipitación más probable para los periodos de retorno (Tr) de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años para las 5 distribuciones estadísticas escogidas, es decir, Gumbel, Pearson III, Normal, Log Pearson III y Log Normal. Se presentará a continuación la metodología de cada una.

4.4.3.1 Distribución estadística Gumbel

Una importante familia de distribuciones usadas en el análisis de frecuencia hidrológico es la distribución general de valores extremos, la cual ha sido ampliamente utilizada para representar el comportamiento de crecientes y sequías (máximos y mínimos). La ecuación de densidad de Gumbel será la (5)

$$P(x \leq x_i) = \frac{1}{\alpha} e^{\left[\frac{-x-S}{\alpha} * e^{\left(\frac{-x-\beta}{\alpha} \right)} \right]} \quad (5)$$

Donde,
 S = desviación estándar

² Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_de_probabilidad

³ Fuente: *Metodología para el ajuste de modelos de valor extremo Tipo I (Gumbel) y Log Pearson Tipo III, para series de valores máximos, 2011, página 57.*

α, β = parámetros de la distribución

La evaluación de esta distribución a través del tiempo inicia con el cálculo de la variable reducida según la ecuación (6).

$$P_0(x) = -\ln \left[\ln \left(\frac{T_r - 1}{T_r} \right) \right] \quad (6)$$

Donde,

T_r = Periodo de retorno, en años [años]

$P_0(x)$ = Probabilidad de ocurrencia, [adimensional]

Posteriormente se calcula la precipitación probable futura con la ecuación (7)

$$X_f = \beta + \alpha * P_0 \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S \quad (8)$$

$$\beta = \bar{x} - 0.5772\alpha \quad (9)$$

Donde,

X_f = Variable aleatoria proyectada

S = desviación estándar

\bar{x} = media o promedio de la variable aleatoria

4.4.3.2 Distribución estadística Pearson III

Esta distribución ha sido una de las más utilizadas en hidrología. Como la mayoría de las variables hidrológicas son sesgadas, la función Gamma o Pearson III se utiliza para ajustar la distribución de frecuencia de variables tales como crecientes máximos anuales, caudales mínimos, volúmenes de flujo anuales y estacionales, valores de precipitaciones extremas y volúmenes de lluvia de corta duración. La ecuación de densidad será la (10)

$$P(x \leq x_i) = \frac{1}{|\alpha|\Gamma(\beta)} \left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{\left(-\frac{x-x_0}{\alpha} \right)} \quad (10)$$

Donde,

α y β = son parámetros de escala y forma respectivamente.

x_0 = parámetro de localización

La evaluación de esta distribución a través del tiempo inicia con el cálculo de la variable reducida según la ecuación (11) únicamente cuando el coeficiente de asimetría es mayor que cero (Ver ecuación (4)). Si este cociente es negativo, la variable reducida se calculará con la ecuación (12).

$$P_0(x) = \frac{1}{T_r} \quad (11)$$

$$P_0(x) = \frac{T_r - 1}{T_r} \quad (12)$$

Donde,

Tr = Periodo de retorno, en años [años]

Po (x) = Probabilidad de ocurrencia, [adimensional]

Posteriormente, se hará el cálculo de la precipitación probable futura con la ecuación (13)

$$X_f = \bar{x} + U_{ca}S \quad (13)$$

Donde,

X_f = Variable aleatoria proyectada

S = desviación estándar

U_{ac} = área bajo la curva, distribución Pearson III

\bar{X} = media o promedio de la variable aleatoria

4.4.3.3 Distribución estadística Normal

La distribución normal es una distribución simétrica en forma de campana, también conocida como Campana de Gauss. Aunque muchas veces no se ajusta a los datos hidrológicos tiene amplia aplicación por ejemplo a los datos transformados que siguen la distribución normal. La ecuación de densidad de la distribución normal es la (14). Esta distribución tiene la particularidad de que la moda, mediana y media son iguales, y el coeficiente de asimetría es cero.

$$P(x \leq x_i) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_i} e^{\left(\frac{-(x-\bar{X})^2}{2S^2}\right)} dx \quad (14)$$

Donde,

\bar{X} = media

S = desviación estándar

X_i = variable aleatoria

La evaluación de esta distribución a través del tiempo inicia con el cálculo de la variable reducida según la ecuación mostrada anteriormente, únicamente cuando el coeficiente de asimetría es mayor que cero (Ver ecuación (17)). Si este cociente es negativo, la variable reducida se calculará con la ecuación (25).

Posteriormente, se hará el cálculo de la precipitación probable futura con la ecuación (15).

$$X_f = \bar{x} + ZS \quad (15)$$

Donde,

X_f = Variable aleatoria proyectada

Z = área bajo la curva, distribución normal

S = desviación estándar

\bar{X} = media o promedio de la variable aleatoria

4.4.3.4 Distribución estadística Log Pearson III

Si los logaritmos Y de una variable aleatoria X se ajustan a una distribución Pearson tipo III, se dice que la variable aleatoria X se ajusta a una distribución Log Pearson Tipo III. Esta distribución es ampliamente usada en el mundo para el análisis de frecuencia de Caudales máximos. Esta se trabaja igual que para la Pearson Tipo III siendo con $\overline{\text{Log}_x}$ y S_{Log} como la media y desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria X. La ecuación de densidad será la (16)

$$P(x \leq x_i) = \frac{1}{|\alpha|\Gamma(\beta)} \left(\frac{x - x_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)} \quad (16)$$

Donde,

α y β = son parámetros de escala y forma respectivamente.

x_0 = parámetro de localización

La evaluación de esta distribución a través del tiempo inicia con el cálculo de la variable reducida según la ecuación (11) únicamente cuando el coeficiente de asimetría es mayor que cero (Ver ecuación (4)). Si este cociente es negativo, la variable reducida se calculará con la ecuación (12).

Posteriormente, se hará el cálculo de la precipitación probable futura con la ecuación (17)

$$X_f = 10^{\overline{x_{\text{log}}} + U_{ac} S_{\text{log}x}} \quad (17)$$

Donde,

X_f = Variable aleatoria proyectada

X_{Log} = Logaritmo de la variable aleatoria

S_{Log} = desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria

$\overline{\text{Log}_x}$ = media o promedio de la variable aleatoria

4.4.3.5 Distribución estadística Log Normal

Si los logaritmos Y de una variable aleatoria X se distribuyen normalmente se dice que X se distribuye normalmente. Esta distribución es muy usada para el cálculo de valores extremos. Tiene la ventaja que $X > 0$ y que la transformación Log tiende a reducir la asimetría positiva ya que al sacar los logaritmos se reducen en mayor proporción los datos mayores que los menores. Esta se trabaja igual que para la Normal, pero con X_y y S_y como la media y desviación estándar de los logaritmos de la variable original X. La función de densidad será la ecuación (18).

$$P(x \leq x_i) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_i} e^{\left(\frac{-(x-\bar{X})^2}{2S^2}\right)} dx \quad (18)$$

Donde,

\bar{X} = media de los logaritmos

S = desviación estándar de los logaritmos

X_i = logaritmo de la variable aleatoria

La evaluación de esta distribución a través del tiempo inicia con el cálculo de la variable reducida según la ecuación (11) únicamente cuando el coeficiente de asimetría es mayor que cero (Ver ecuación (4)). Si este cociente es negativo, la variable reducida se calculará con la ecuación (12).

Posteriormente, se hará el cálculo de la precipitación probable futura con la ecuación (19)

$$X_f = 10^{\overline{x_{log}} + U_{ac} S_{logx}} \quad (19)$$

Donde,

X_f = Variable aleatoria proyectada

X_{Log} = Logaritmo de la variable aleatoria

S_{Log} = desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria

$\overline{Log_x}$ = media o promedio de la variable aleatoria

4.4.4 Prueba de bondad de ajuste

La prueba de Kolmogorov – Smirnov es una prueba no paramétrica que se utiliza para determinar la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí.⁴

Para cada serie de datos, habrá dado como resultado seis valores de precipitación máxima por cada periodo de retorno analizado. Se escogió entonces el mejor ajuste probabilístico según la prueba de bondad de ajuste de Smirnov – Komogorov.

La prueba considera la desviación de la función de la distribución de probabilidad de la muestra $P(x)$ de la función de probabilidades teórica, escogida $P_o(x)$. Para esto se calculó la probabilidad de ocurrencia de cada valor máximo de la serie de datos de cada estación, $P_o(x)$, y se comparó con la probabilidad teórica $P(x)$, (Ver Ecuación (20))

$$P(x) = \frac{m}{n} \quad (20)$$

Donde,

m = el rango que se asigna a cada uno de los valores ordenados de forma creciente

n = número de datos total

Se mostrará a continuación el procedimiento para el cálculo de cada probabilidad de ocurrencia $P_o(x)$ para las distribuciones seleccionadas: Gumbel, Pearson III, Normal, Log Pearson III, Log Normal y Distribución de valores máximos EV3.

⁴ Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Prueba_de_Kolmog%C3%B3rov-Smirnov

4.4.4.1 Distribución estadística Gumbel

Se usarán las ecuaciones (21), (22), (23) y (46) para calcular la probabilidad de ocurrencia de cada valor máximo de la serie.

$$P_0(x) = e^{-e^{-d(x-\beta)}} \quad (21)$$

$$d = \frac{1}{\alpha} \quad (22)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S \quad (23)$$

$$\beta = \bar{x} - 0.5772\alpha \quad (24)$$

Donde,

X = es la variable aleatoria

S = desviación estándar

\bar{X} = media o promedio de los datos

Po (x) = Probabilidad de ocurrencia, [adimensional]

4.4.4.2 Distribución estadística Pearson III

Para esta distribución se usará la ecuación (25) para evaluar su probabilidad de ocurrencia.

$$P_0(x) = \frac{x - \bar{x}}{S} \quad (25)$$

Donde,

x = Variable aleatoria

S = desviación estándar

\bar{X} = media o promedio de los datos

Po (x) = Probabilidad de ocurrencia, [adimensional]

4.4.4.3 Distribución estadística Normal

Para esta distribución se usará la ecuación (26) para evaluar su probabilidad de ocurrencia.

$$P_0(x) = \frac{x - \bar{x}}{S} \quad (26)$$

Donde,

x = Variable aleatoria

S = desviación estándar

\bar{X} = media o promedio de la variable aleatoria

Po (x) = Probabilidad de ocurrencia, [adimensional]

4.4.4.4 Distribución estadística Log Pearson III

Para esta distribución se usará la ecuación (27) para evaluar su probabilidad de ocurrencia.

$$P_0(x) = \frac{X_{\log} - \overline{\text{Log}_x}}{S_{\text{Log}_x}} \quad (27)$$

Donde,

X_{\log} = Logaritmo de la variable aleatoria

S_{Log} = desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria

$\overline{\text{Log}_x}$ = media o promedio de la variable aleatoria

Po (x) = Probabilidad de ocurrencia, [adimensional]

4.4.4.5 Distribución estadística Log Normal

Para esta distribución se usará la ecuación (28) para evaluar su probabilidad de ocurrencia.

$$P_0(x) = \frac{\text{Log}_x - \overline{\text{Log}_x}}{S_{\text{Log}_x}} \quad (28)$$

Donde,

Log_x = Logaritmo de la variable aleatoria

S_{Log} = desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria

$\overline{\text{Log}_x}$ = media o promedio de la variable aleatoria

Po (x) = Probabilidad de ocurrencia, [adimensional]

4.4.5 Curva de intensidad, duración y frecuencia (IDF's)

La curva Intensidad Duración Frecuencia, representa la intensidad (I) o magnitud de una lluvia fuerte expresada en milímetros por hora, para una duración (D) determinada que usualmente puede ser 30, 60, 90 120 o 360 minutos y que se estima tiene una probabilidad de ocurrencia, o frecuencia (F) expresada en años, lo que también se conoce como periodo de retorno (IDEAM, 2023).

Se determinó como representativa la estación Aeropuerto Camilo Daza, la cual se encuentra en cercanías a la cuenca de estudio y tiene un periodo de registro mayor a 30 años. Este periodo es apropiado tanto para la estimación de caudales máximos, como para la determinación de caudales medios y mínimos. A partir de esta estación, la cual es suministrada por el IDEAM se realiza la construcción de las curvas IDF sintéticas regionales (Vargas & Diaz-Granados, 1998) según la ecuación presentada en la metodología:

$$I = a \left(\frac{T^b}{t^c} \right) M^d$$

Donde:

I : es la intensidad de diseño para el período de retorno (T) y la duración (t) deseados.

M : es el promedio de las precipitaciones diarias máximas anuales de la estación o área.

El IDEAM proporciona estas curvas, las cuales fueron realizadas en diciembre del año 2016 por el grupo de investigación en ingeniería de los Recursos Hídricos de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, empleando información pluviométrica de la estación desde 1973 a 2010. Los datos de intensidad fueron ajustados a distribución de probabilidad Gumbel, los parámetros estimados fueron con el método de L-Momentos y aplicaron cuatro metodologías para la estimación de las curvas IDF generalizadas (Chen 1983, Vargas y Díaz-Granados 1998, el escalamiento de la precipitación y el proceso máximo estable), determinando así los factores C1, X0 y C2 para cada periodo de retorno, los cuales permiten calcular la intensidad de la lluvia para una duración establecida (IDEAM, 2023).

Tabla 1 Factores para generación de curvas IDF.

TR (años)	C1	X0	C2
2	2393.698	23.248	0.926
3	2766.321	24.899	0.921
5	3218.148	26.547	0.919
10	3827.385	28.354	0.919
25	4647.123	30.280	0.920
50	5283.186	31.498	0.922
100	5933.377	32.561	0.924

Fuente: (IDEAM, 2023)

Tabla 2 Datos para curvas de IDF

D (min)	$I_{TR=2}$	$I_{TR=3}$	$I_{TR=5}$	$I_{TR=10}$	$I_{TR=25}$	$I_{TR=50}$	$I_{TR=100}$
15	82.0	92.8	104.9	120.0	139.1	153.3	167.3
30	60.6	69.3	79.0	91.2	106.6	118.0	129.3
60	39.9	46.4	53.6	62.7	74.1	82.6	91.1
120	24.0	28.1	32.7	38.4	45.7	51.1	56.5
360	9.9	11.7	13.7	16.2	19.3	21.6	23.9

Fuente: (IDEAM, 2023)

A continuación, se presentan las curvas IDF generadas para la ciudad de Cúcuta, tomada de la fuente de datos del IDEAM.

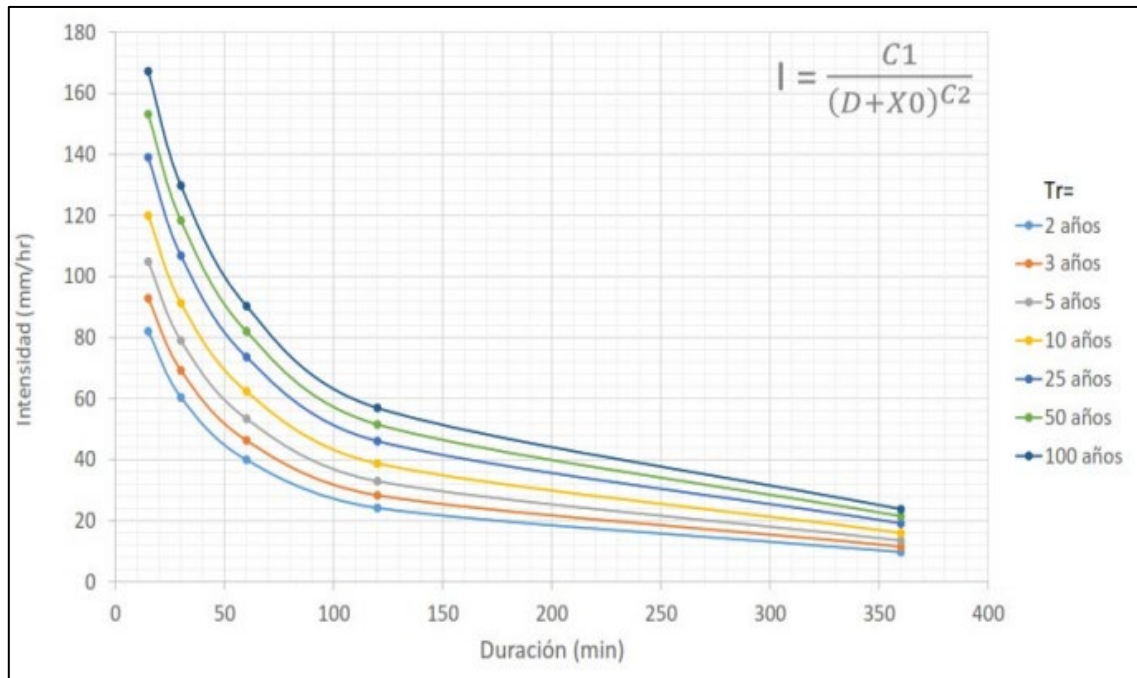


Ilustración 9 Curva IDF de diseño.

Fuente: (IDEAM, 2023)

4.5 Diagnóstico del Alcantarillado

En el área urbana del municipio de Cúcuta la operación, ampliación, rehabilitación y mantenimiento de la infraestructura para la prestación del servicio público de alcantarillado de la ciudad se encuentra a cargo de la EIS CÚCUTA S.A E.S.P., prestación que se hace a través de un operador especializado, vinculado mediante el Contrato de Operación N° 030 del 2006. El contrato excluye de las obligaciones contractuales el alcantarillado pluvial y el tratamiento de las aguas residuales, las cuales están a cargo de la administración municipal. El sistema de evacuación de las aguas negras y lluvias de la ciudad trabaja mediante tres (3) sistemas por gravedad, los cuales se definen así:

Tipo de Alcantarillado	Km	%
Alcantarillado Combinado	11.64	97.96
Alcantarillado Sanitario	1179	0.97
Alcantarillado Pluvial	12.95	1.08

En el alcantarillado combinado, no hay separación de aguas negras y lluvias. Se encuentra en la zona centro de la ciudad, ocupando cerca del 1% del área total de la ciudad. Los principales colectores combinados se encuentran entre la avenida 1 y la 13, y entre la calle 15 hasta empalmar con el interceptor izquierdo del canal Bogotá, en el centro de la ciudad.

El alcantarillado pluvial está diseñado exclusivamente para la recolección y transporte de aguas de escorrentía en épocas de invierno. La conducción de dichas aguas se hace a través de las rasantes de las vías urbanas (calles canal), sumideros, colectores y canales. La responsabilidad del manejo del alcantarillado pluvial está a cargo de la administración municipal en cabeza de la Secretaría de Infraestructura. El operador de los servicios de acueducto y alcantarillado sólo se responsabiliza del mantenimiento de algunas obras de infraestructura pluvial que hacen parte del anexo del Contrato de Operación N° 030 del 2006.

El alcantarillado netamente sanitario (totalmente separados del sistema de aguas lluvias) es el que tiene por objeto recolectar y conducir hasta su descarga final y de manera sanitaria solamente las aguas negras. Existen algunos sectores de la ciudad en los cuales el alcantarillado funciona como semicombinado, por conexiones erradas en las viviendas o en los sumideros urbanos.

Los principales colectores sanitarios, por tamaño y longitud son los siguientes: izquierdo y derecho del canal Bogotá, emisario final Pamplonita que entrega en Caño Picho, el interceptor izquierdo y derecho del río Pamplonita, colector de San Luis, los emisarios Atalaya y la Libertad, colector Táchira, colector Aeropuerto – Cárcel Modelo – Caño Picho, colector Los Olivos, colector Tucunaré – La Primavera, colector El Salado, colector Panamericano, colector San Martín, colector Aguas Calientes – Las Margaritas, colector Guaimaral, colector La Laguna, colector Los Almendros – La Cañada, colector Prados del Norte, colector Prados del Este, colector Nuevo Escobal, colector Los Pinos, colector San Mateo – Centro Comercial Bolívar.

Las aguas negras que conduce al alcantarillado del municipio son vertidas a tres (3) cuencas de drenaje, las cuales son:

Cuenca	Área (Ha)	%
Río Pamplonita	3694.14	70.0
Río Zulia	1083.47	20.5
Río Tachira	498.62	9.5

El alcantarillado sanitario se concibió como tal, pero por efecto de miles de conexiones erradas, las aguas lluvias de patios interiores de viviendas entran a los colectores y causan serios problemas de incapacidad hidráulica y abrasión.

Adicionalmente, se tienen vertimientos sobre los diferentes cauces de aguas lluvias o drenajes naturales que deben conducirse y concentrar los vertimientos hacia las plantas de tratamiento previstas, por lo que se requiere la construcción de colectores sanitarios paralelos a estos. En la mayoría de los casos no existen las franjas de retiro como lo establece el POT para su instalación porque las viviendas han construido sobre el mismo borde del canal e incluso encima de ellos. Adicionalmente gran parte de la cuenca de la Quebrada Seca en su zona de media ladera se

encuentra localizada en zona de muy alto riesgo, apreciándose incluso grietas protuberantes en el suelo, situación que agrava aún más la problemática. Igual situación ocurre con los lotes donde se proyectan las tres plantas de tratamiento de aguas residuales. En algunos sitios ya se observan invasiones asentadas en sus inmediaciones.

Otro problema que afronta este sistema es la insuficiencia hidráulica por bajas pendientes y diámetros pequeños, la colmatación total de colectores y la construcción de cientos de viviendas en diferentes sectores de la ciudad encima de colectores de aguas negras y lluvias. Los sistemas de evacuación de las aguas negras y lluvias del municipio no cuentan con tratamiento de estas, lo que conlleva a la contaminación ambiental de las cuencas de los ríos Pamplonita, Zulia y Táchira. (Alcaldía San José de Cúcuta, 2020)

4.5.1 Catastro de redes

De acuerdo con la información extraída del trabajo de grado de cuantificación de la peligrosidad por inundaciones de origen pluvial, desarrollado en la ciudad de San José de Cúcuta, se menciona que se realizó la inspección de todos los pozos, canales y cajas encontradas dentro de la zona de estudio, correspondiente al alcantarillado pluvial existente, identificando la profundidad, cotas claves y si tienen conectividad.



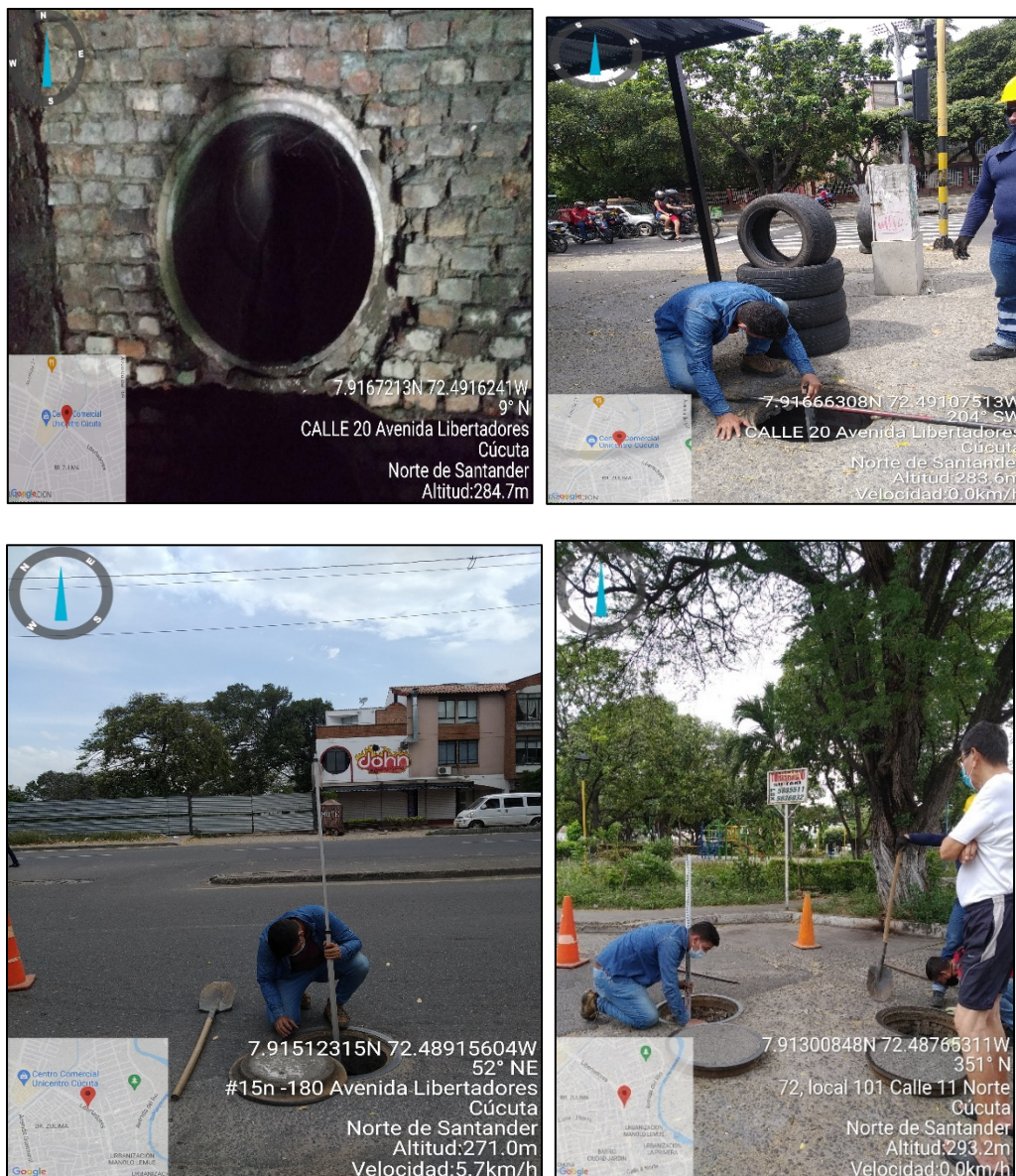


Ilustración 10 Registro Fotográfico Catastro de redes.

Fuente: (Sánchez Tapiero Diego Iván, 2021)

El agua lluvia del noroccidente de la zona de estudio desde las inmediaciones del barrio Prados del Norte y Unicentro hasta llegar al canal Bogotá, es recolectado a través de tuberías en concreto de 24 y 33 pulgadas (in). El canal rectangular en concreto de 1.85 m de ancho por 1 m de alto, situado en la avenida 2 Norte, alimenta la tubería de 33 in.

El agua lluvia proveniente del barrio Gratamira, el barrio Zulima y el flujo que circula por la Av. Libertadores, es recolectado por tuberías de 0.61 m (36 in) y 0.84 (40 in) en concreto, instaladas al margen izquierdo de la avenida libertadores hasta la calle 18 Norte, donde cruza la avenida, instalándose al costado derecho de esta misma hasta llegar al canal Bogotá a descargar a una

altura de 0.75 m de diferencia entre el fondo del canal y la cota batea de la tubería.

El flujo de escorrentía que proviene del barrio Zulima por la calle 12 y 14 Norte, la urbanización La Mar y el parque Gratamira, es recolectado por sumideros instalados en las vías y transportado mediante canales cerrados rectangulares en concreto de 1,4 m de ancho y 0,6 m de alto hasta la intercesión de la avenida 15ª Este y la calle 14 Norte, donde es entregado a dos tuberías de 0.56 m (22 in) en policloruro de vinilo (PVC) hasta llegar a la Av. Libertadores, en este punto, se encuentra instalada una tubería de 1.27 m (40 in) en PVC que se encarga de transportar el fluido hasta el rio Pamplonita.

En la calle 9ª Norte se encuentra un canal trapezoidal en concreto y piedra con un ancho promedio de 1,2 m y 1 m de alto, el cual recibe una parte del agua de lluvias proveniente del barrio Guaimaral, San Eduardo y los Acacios, transportándola hasta el rio pamplonita. Una parte del canal se encuentra abierta, ya que la comunidad del lugar por la calle 9ª Norte después de la intercesión con la avenida libertadores construyeron sus viviendas encima del canal, disminuyendo su sección hidráulica. Finalmente, en el barrio tasajero se visualiza las tuberías de 0.45 m (18 in) y 0.76 m (30 in) en concreto que transporta el flujo de escorrentía que se acumula al final de las calles 21, 21ª, 21b y 22 Norte (Sánchez Tapiero Diego Iván, 2023).

De forma general, se pudo identificar que las tuberías están en PVC y concreto y los canales en concreto, para un total de 2.7 km de red y canales. Se evidencian también que hay pozos y redes que se encuentran cubiertos por pavimento o se encuentran colmatados de tierra u otro material que no permiten que funcione adecuadamente.

A continuación, se presentan las redes y canales que conforman actualmente el sistema de alcantarillado pluvial en la zona de estudio de la ciudad San José de Cúcuta.



Ilustración 11 Zona de estudio
Fuente: Elaboración Propia

4.6 Diseño Hidrológico de los SUDS

El uso de las estructuras SUDS contribuye a que el ciclo hidrológico urbano, tienda en algún grado, a condiciones más naturales. Los procesos más frecuentes para este propósito son la infiltración y la detención/retención de agua.

Los tipos de tratamiento que utilizan SUDS se pueden dividir en tratamiento en línea y tratamiento fuera de línea desde el punto de vista de la ubicación del tipo y la interacción con el sistema de drenaje. Con procesamiento en línea, el tipo recibe todo el afluente de escorrentía de aguas pluviales. Por lo tanto, el diseño debe considerar que un caudal alto, reducirá la eficiencia del tratamiento y lo controlará adecuadamente cuando fluya a través de la estructura de desagüe hacia el sistema de recolección. En el tratamiento fuera de línea, este tipo solo recibe un caudal que no supera el caudal de tratamiento de agua previsto, por lo que su sistema de derivación es muy importante en su diseño.

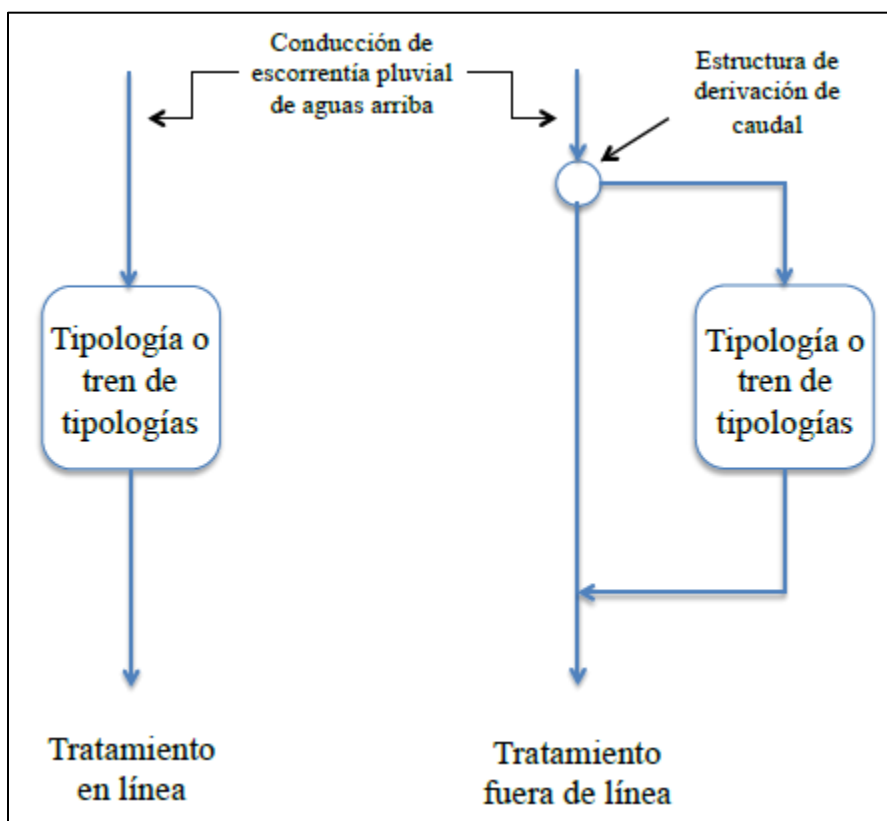


Ilustración 12 Tratamientos en línea y fuera de línea.

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

Las formas más comunes de tratamiento son: (a) infiltración, donde el agua penetra suelos naturales y/o capas de filtros artificiales y por lo tanto ayuda a remover contaminantes, (b) retención o almacenamiento temporal de agua para tratamiento, donde una pequeña porción del agua puede penetrar y remover los contaminantes mientras el resto del volumen fluye hacia el sistema de recolección de manera controlada, favoreciendo la decantación y remoción de contaminantes durante el tiempo de residencia planificado y reduciendo la carga máxima y escorrentía del sistema de recolección; (c) retención o almacenamiento permanente de agua, en el cual el asentamiento de partículas es el mecanismo más importante de tratamiento; y (d) bio-retención, la cual esta asociada al almacenamiento temporal de agua con infiltración natural o artificial, transpiración, remoción de contaminantes de la escorrentía, reducción de volúmenes de ésta y de picos, debido a la interacción del agua con actividad biológica. (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

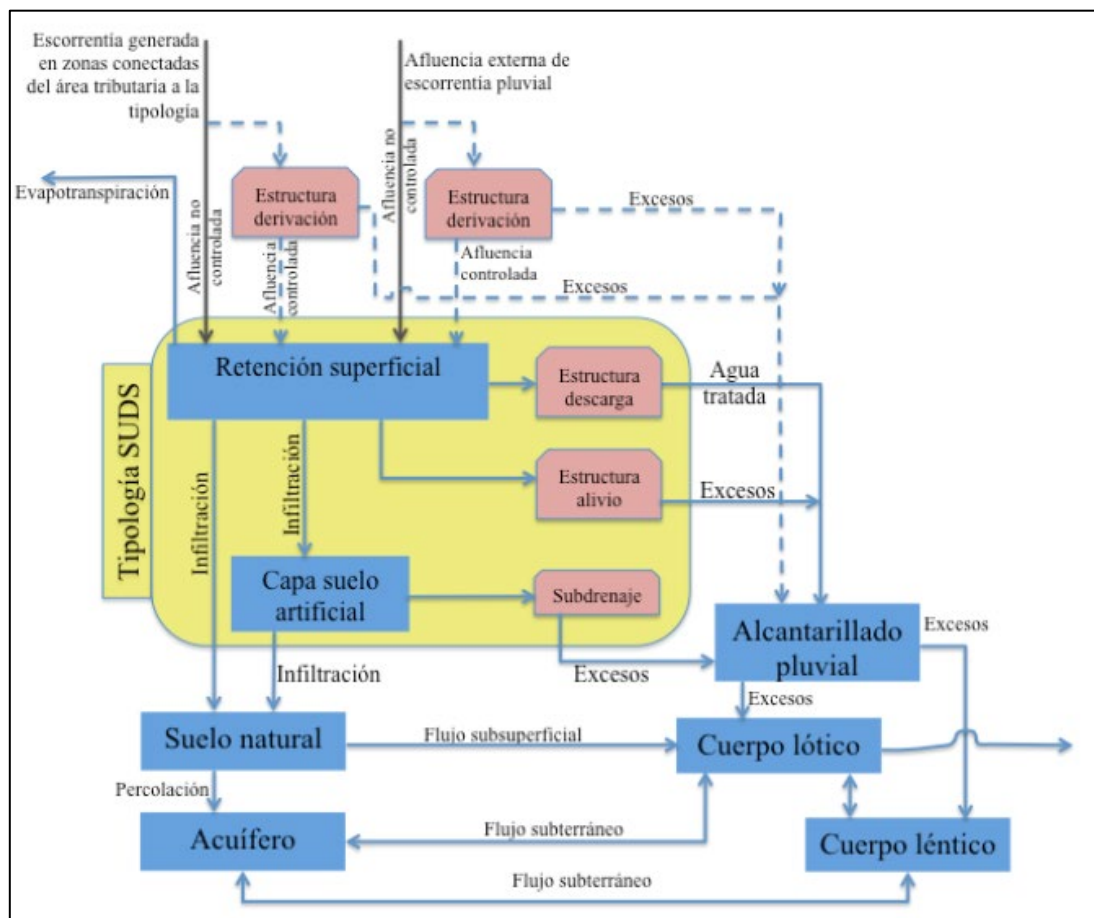


Ilustración 13 Flujos y procesos en tratamiento por retención.

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

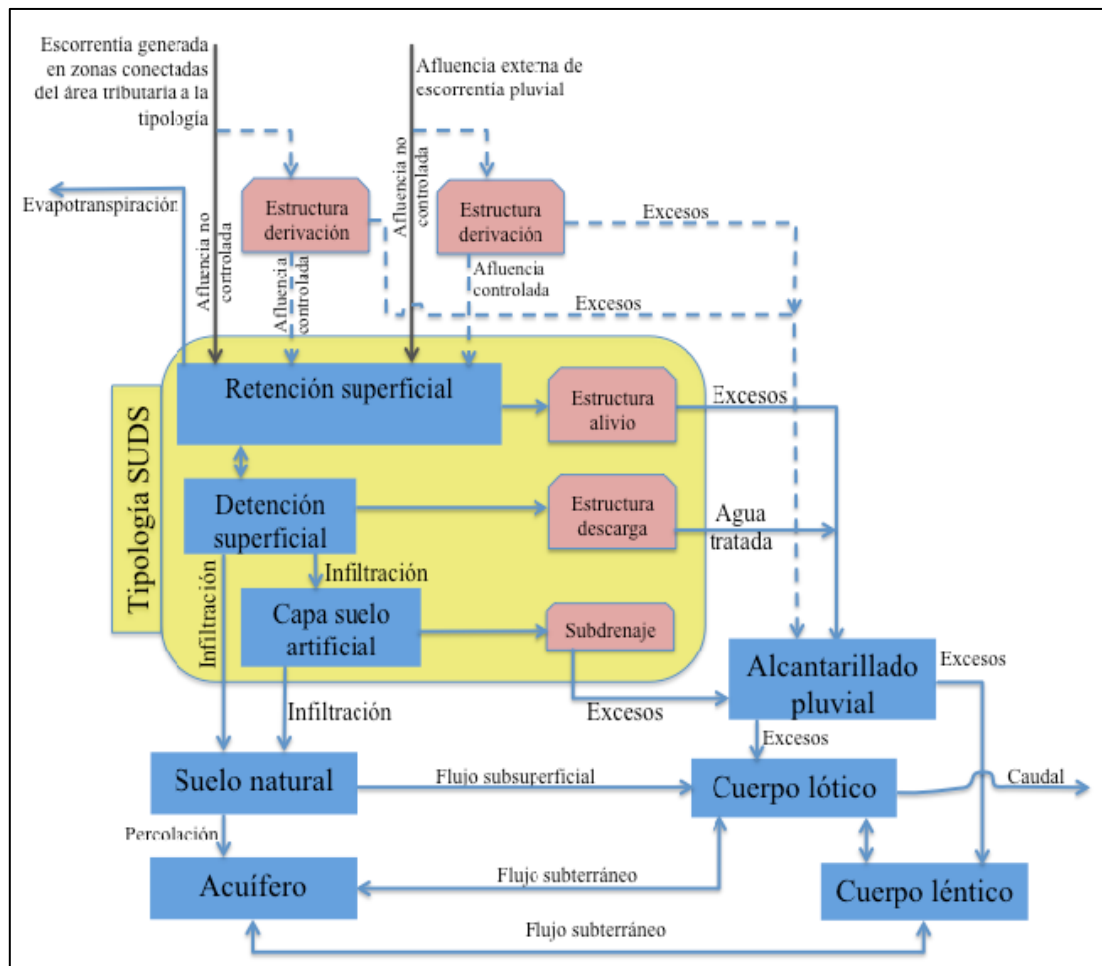


Ilustración 14 Flujos y procesos en tratamiento por detención.

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

Dependiendo del tipo de SUDS, su diseño puede basarse en el flujo del proceso o el volumen del proceso. Por lo general, el primero tiene como objetivo reducir los flujos máximos a través del almacenamiento intermedio, mientras que el segundo tiene como objetivo principal reducir la escorrentía y las cargas de contaminación.

4.6.1 Determinación de h_{WQCV} a partir de la profundidad de lluvia (h_p)

En algunos casos, h_{WQCV} se estima de manera indirecta, al tomarse como equivalente al punto de inflexión del histograma acumulado normalizado de eventos independientes de tormenta o como un percentil de estos. Para esto, la profundidad de lluvia h_p asociada al punto de inflexión o al percentil de la serie de eventos de tormenta debe ser multiplicada por un factor de escorrentía K_i para obtener h_{WQCV} :

$$h_{WQCV} = K_i h_p$$

Donde h_{WQCV} = profundidad de lámina del volumen de calidad de agua (mm), K_i = factor de escorrentía y h_p = profundidad de lluvia (mm).

4.6.2 Determinación de V_c

Dado el valor estimado de h_{WQCV} , el volumen de tratamiento se puede establecer con la siguiente ecuación:

$$V_c = 10aCh_{WQCV}A$$

Donde V_c = Volumen de tratamiento (m^3), A = Área de drenaje (ha), h_{WQCV} = Profundidad de lámina para el volumen de tratamiento (mm), a y C = Coeficientes dependientes de la tipología y el tiempo de drenaje.

Para la aplicación de la Ecuación, a es igual a 0.7, 0.8, 0.9 o 1.0 según sea el tiempo de drenaje de 6, 12, 24 o 40 horas de la tipología correspondiente y C es un factor que depende de la tipología. A continuación, se presenta un resumen de los valores de tiempos de drenaje, de a y de C típicamente recomendados.

Tabla 3 Tipologías de SUDS y valores de tiempo de drenaje, a y C .

Tipología	Tiempo de drenaje (hr)	a	C	Lugar
Cuenca seca de drenaje extendido (CSDE)	12	0.8	1.3	Aspen
	40	1.0	1.2	Rapid City
	40	1.0	1.2	Denver
Porous landscape detention	12	0.8	1.0	Rapid City
Humedal artificial	24	0.9	1.0	Rapid City
	12	0.8	>0.75	Aspen
	24	0.9	1.0	Denver
Zona de bio-retención*	12	0.8	1.0	Denver
Pavimento poroso	12	0.8	1.0	Aspen
	12	0.8	1.0	Denver
Filtro de arena	24	0.9	1.0	Denver
Pondaje húmedo	12	0.8	1.0	Denver
Tanque de almacenamiento (aislado y subterráneo)	12	0.8	1.0	Denver

*Para los alcorques inundables se pueden considerar valores similares para los parámetros presentados

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

Sin embargo, las estructuras de SUDS se suelen implementar para áreas de drenaje pequeñas. Teniendo en cuenta que para áreas de este tipo la EAB recomienda la aplicación de la ecuación del método racional para el cálculo de caudales de escorrentía, se considera apropiado aplicar el mismo principio para el cálculo del volumen. De esta forma, como los coeficientes de escorrentía C reportados en la norma técnica de la EAB y los coeficientes K son compatibles, el volumen de calidad también puede calcularse por medio de la siguiente fórmula, que involucra directamente la profundidad de lluvia:

$$V_c = Ch_p A$$

Donde V_c = Volumen de tratamiento (m^3), A = Área de drenaje (m^2), h_p = Profundidad de lluvia (m), y C = Coeficiente de escorrentía del terreno.

4.7 Modelación Computacional en PCSWMM

Para la modelación del sistema se utilizó el software PCSWMM, es una interfaz desarrollada por Computational Hydraulics Inc. (CHI). Es un modelo integrado de SIG que utiliza SWMM 5.0 como modelo de motor computacional para los cálculos hidrológicos e hidráulicos. Los modelos PCSWMM se pueden usar tanto para predicciones continuas a largo plazo como para modelado de eventos únicos. Es un modelo de captación integrada que incluye alcantarillas pluviales, alcantarillas combinadas, sistemas fluviales, plantas de tratamiento y aguas receptoras. El área de captación se puede dividir en subcuencas y el modelo se puede utilizar para cálculos 1D y 2D.(Stehli et al., 2021).

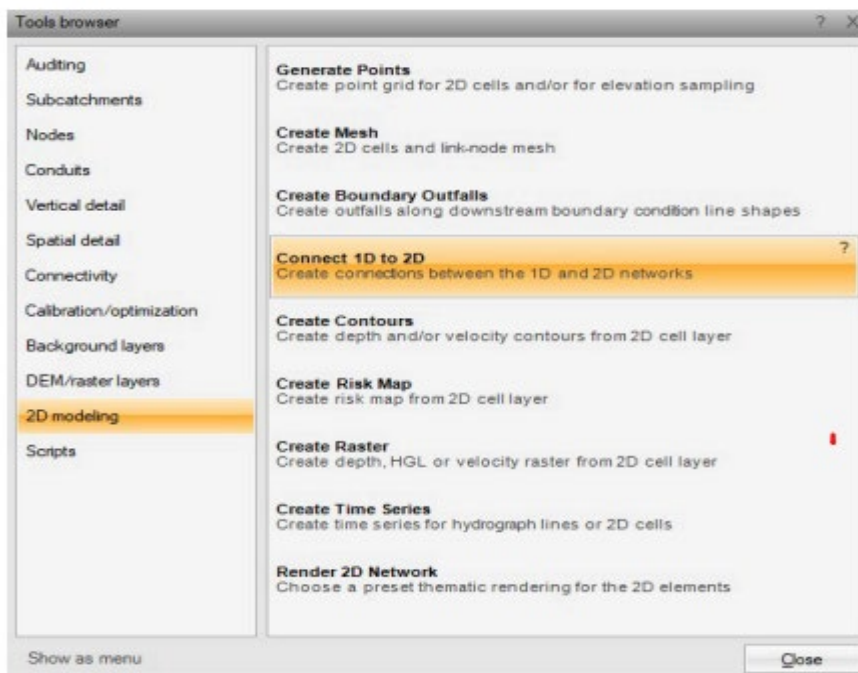
Simula eventos reales de lluvia con la implementación de hietogramas, curvas de Intensidad-Duración Frecuencia (IDF) y series de tiempo. Así mismo, proporciona herramientas de sensibilidad, optimización/calibración y análisis de errores para mejorar la modelación hidráulica. Utiliza el motor de cálculo de SWMM de Storm Water Management Model (SWMM). El SWMM es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones y escorrentía cuyo objetivo es simular características como cantidad y calidad de la escorrentía, ya sea de un solo evento o a largo plazo principalmente enfocado a las zonas urbanas. Para llevar a cabo la simulación el programa hace uso de tres componentes; el primero corresponde a la escorrentía el cual opera sobre un conjunto de subcuenca que reciben precipitaciones y a su vez generan escorrentía, la segunda corresponde de la conducción la cual transporta la escorrentía a través de sistemas de tuberías, canales y dispositivos de almacenamiento, por último el software hace un seguimiento de la calidad y cantidad de escorrentía generada en cada subcuenca, así como también el caudal y profundidad de flujo [manual SWMM].

Se basa en la solución de las ecuaciones Saint Venant para la conservación de la masa y el momento en un flujo inestable gradualmente variado. Estas ecuaciones se resuelven mediante el método numérico de diferencias finitas con aproximaciones sucesivas, permitiendo elegir el método de enrutamiento (flujo constante, onda cinemática y onda dinámica) para resolverlas. PCSWMM para cada uno de los métodos de enrutamiento utiliza la ecuación de Manning para relacionar el caudal con la profundidad del flujo y la pendiente de fricción. Así mismo, cuando se producen flujos presurizados se pueden usar las ecuaciones de Darcy-Weisbach o Hazen-Williams (Sánchez Tapiero Diego Iván, 2023).

4.7.1 Construcción Modelo Hidrológico

Para la construcción del modelo se determinó el porcentaje de impermeabilidad y permeabilidad, esto definido a partir del tipo de suelo y superficie de cada subcuenca. Además, para las tuberías y canales se asignó respectivamente el coeficiente de rugosidad de Manning. Se implementó también un enfoque de conexión directa 1D-2D, para que el flujo en las calles (2D) se conectará directamente con la red de drenaje existente (1D). Posteriormente, se establecieron los parámetros en cada una de las capas, en la capa que representa el canal se creó una malla direccional con un coeficiente de rugosidad ponderado de 0.02 para concreto y roca; en las zonas permeables se utilizó una malla hexagonal y un coeficiente de rugosidad ponderado de 0.285, y para las vías se implementó un coeficiente de rugosidad de 0.011 y una malla hexagonal. Se seleccionó el método de onda dinámica ignorándose los términos inerciales para resolver las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento completas, obteniendo resultados más precisos en la modelación para el tipo y tamaño de las mallas en el modelo bidimensional. La representación topográfica se realizó con celdas en dos dimensiones (2D) basándose en las 79 resoluciones de las mallas definidas en las capas delimitadoras mencionadas anteriormente. Se asignó a cada subcuenca del modelo computacional la conexión en 2D de descarga, permitiendo representar que la escorrentía pase primero por las calles y luego ingrese a los desagües pluviales, en las áreas donde se cuenta con tuberías o canales (Sánchez Tapiero Diego Iván, 2023).

Ilustración 15 Herramienta conexión Directa.



Fuente: PCSWMM Herramienta de conexión directa 1D-2D

4.7.2 Configuración lluvia de Diseño en el Modelo Computacional

PCSWMM tiene incorporado una herramienta para crear tormentas de diseño. El software tiene 60 hidrogramas de tormentas de diseño que incluyen el método de Chicago, Symmetric 24 h, distribución SCS, tormentas AES, distribuciones Huff y otras tormentas de diseño local. Para cada tormenta, los diversos parámetros se pueden ajustar para que coincidan con los estándares de diseño.

Los hietogramas de diseño se crearon usando el método de distribución de tormentas de Chicago. Esta distribución de tormentas es utilizada en áreas urbanas y se deriva en base a la relación intensidad, duración y frecuencia (IDF) para la precipitación en el área. El software para calcular la distribución de Chicago utiliza los valores a,b,c proporcionados por el usuario. PCSWMM calcula la intensidad/volumen/acumulativo de lluvia para cada paso de tiempo de lluvia por integración. Para el intervalo de tiempo en el que se produce el pico, la intensidad media se calcula directamente mediante la ecuación de tormenta de Chicago.

Para este método se utilizan las variables a, b, c, los cuales están dados por la ecuación de las curvas IDF, permitiendo obtener los valores de la intensidad para los diferentes periodos de retorno y duraciones. Teniendo en cuenta lo anterior, se crea en el software los hietogramas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 50 y 100 años. Estos hietogramas fueron asignados a los pluviómetros para realizar las simulaciones en el área de estudio. (Sánchez Tapiero Diego Iván, 2023).

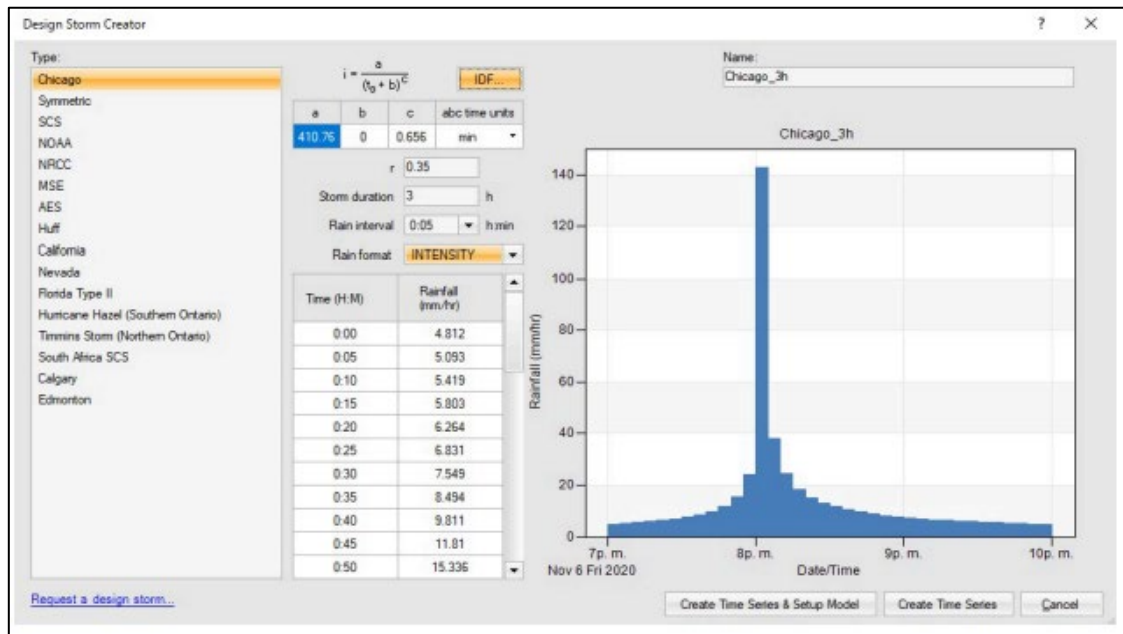


Ilustración 16 Herramienta para crear tormentas de diseño.

Fuente: PCSWMM.

4.7.3 Modelación Hidrológica e Hidráulica

Se estableció en primer lugar el período y duración de la simulación, con el fin de ser coincidentes con los hietogramas. Para cada simulación, se analizaron los errores de continuidad y enrutamiento del flujo, comprobando que fuera inferior a 1%, valor establecido por el software para aceptar los resultados del modelo. Teniendo en cuenta lo anterior, se crearon mapas de inundación con el fin de identificar las zonas más vulnerables en el área de estudio (Sánchez Tapiero Diego Iván, 2023).

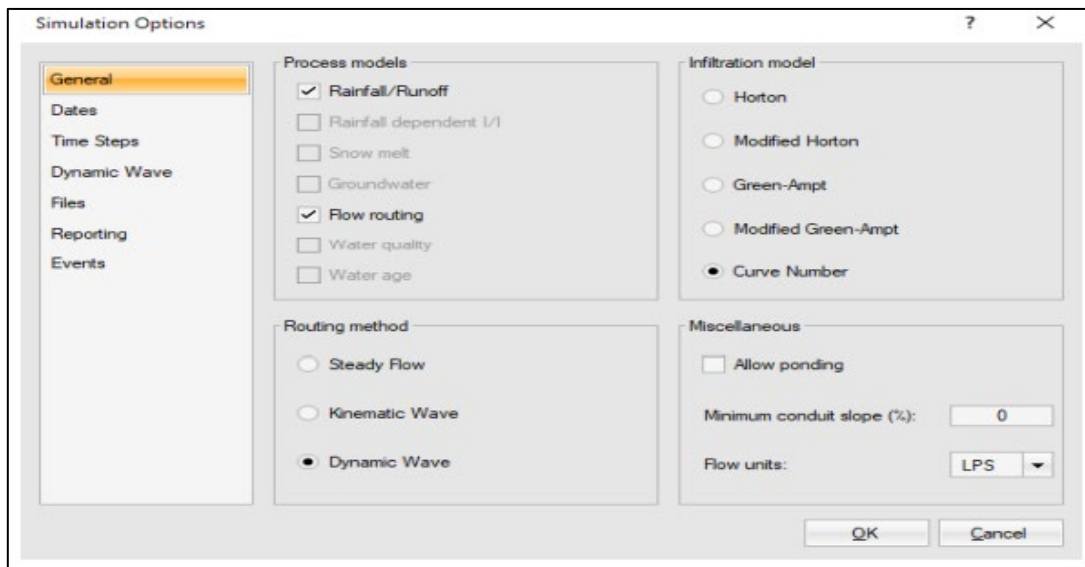


Ilustración 17 Opciones de Simulación.

Fuente: PCSWMM.

4.8 Modelación de los sistemas de alcantarillado en SewerGems

A través de la modelación realizada se estimaron parámetros básicos para el análisis del funcionamiento del sistema de alcantarillado, el caudal, la velocidad, el diámetro, el número de Froude y la fuerza tractiva entre otros.

4.8.1 Definición del esquema físico y codificado de la red

La modelación del sistema existente se adelantó mediante la implementación del programa Bentley SewerGEMS V8i y bajo los parámetros del Reglamento de Acueducto y Saneamiento Básico RAS 2000, el cual permite determinar el funcionamiento hidráulico del sistema diseñado e identificar los sectores que no cumplen con las normas mínimas de diseño.

4.8.2 Análisis de carga para flujos pluviales con SewerGEMS V8i

A continuación, se presenta la metodología mediante la cual se realizó la migración de los datos al programa, así como la carga de los caudales de diseño del sistema.

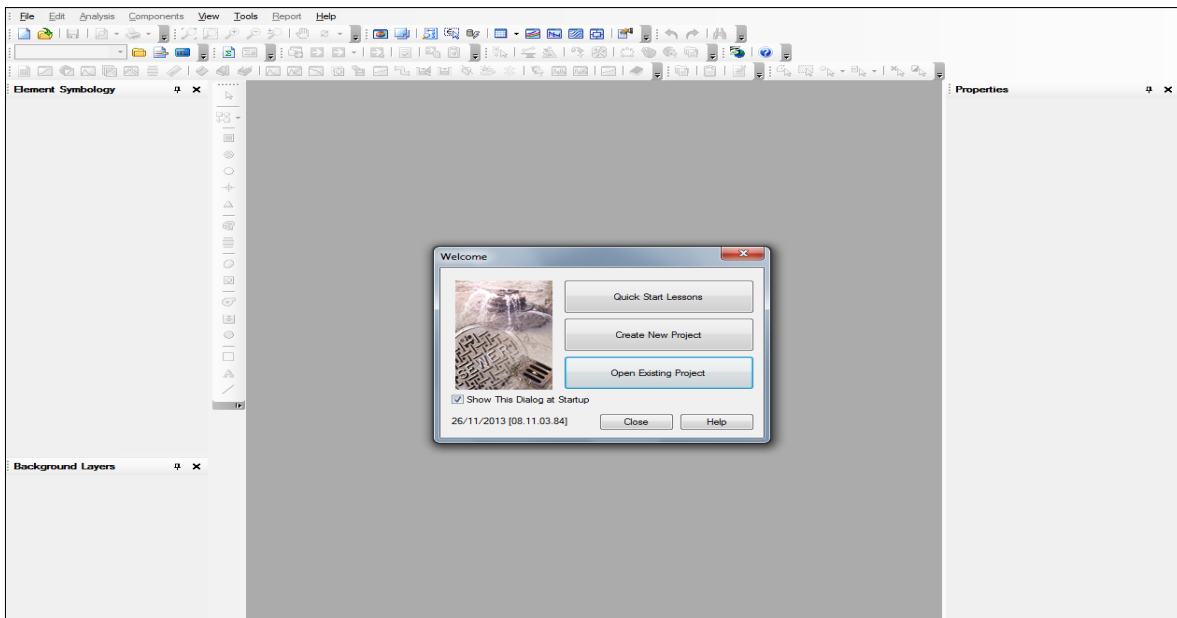


Ilustración 18 Modelación con Bentley SewerGEMS V8i.

Fuente: SewerGems V8i.

El primer paso es la creación de un proyecto nuevo, menú FILE, NEW

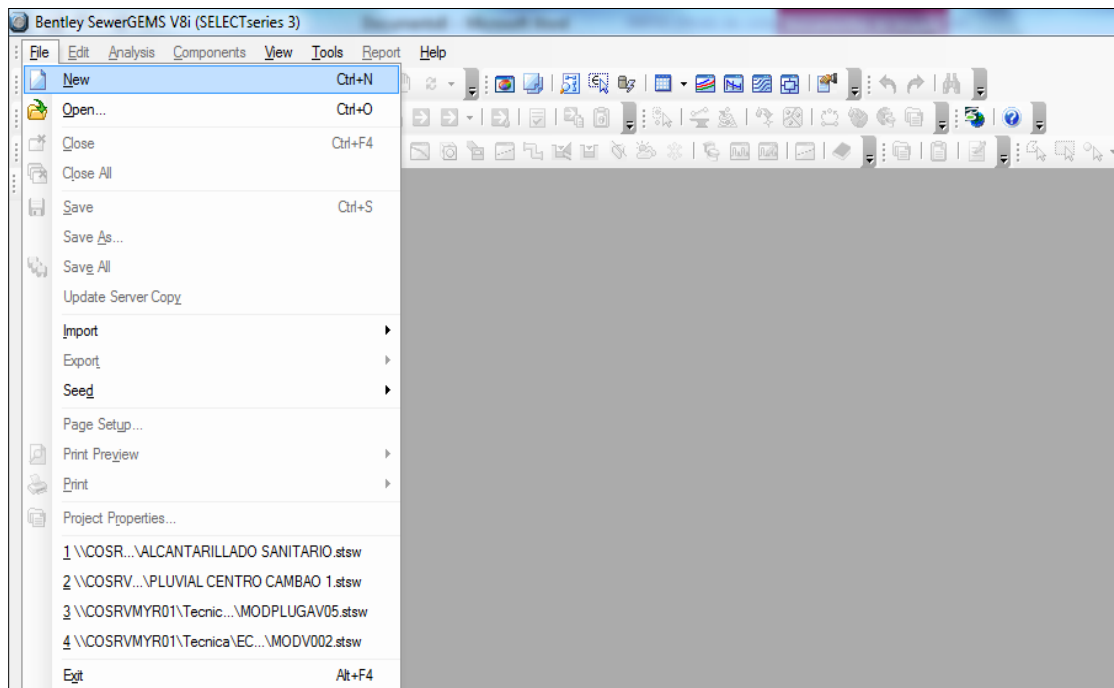


Ilustración 19 Modelación con Bentley SewerGEMS V8i.

Fuente: SewerGems V8i.

Se realizó una modelación del alcantarillado pluvial y el paso a seguir es el ingreso de los datos iniciales al programa por medio de la herramienta Model Builder. Para lo cual se debe manejar una correcta topología en cuanto a conectividad de los tramos y numeración de los pozos en un archivo base de Microsoft Excel, el cual facilitara el ingreso de la información sin recurrir a otros procedimientos.

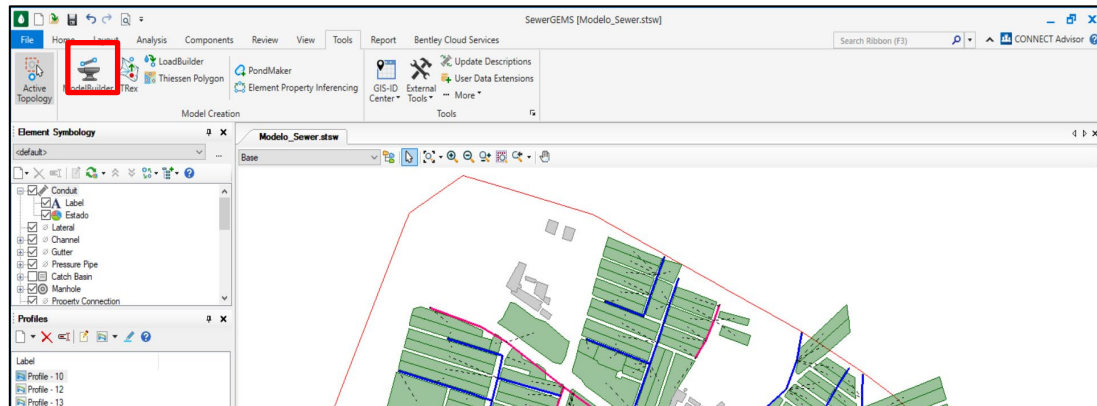


Ilustración 20 Herramienta Model Builder.

Fuente: SewerGems V8i.

El resultado final del procedimiento es la visualización del modelo con sus respectivos tramos, pozos, vertimientos, magnitud y sentido de la tubería.

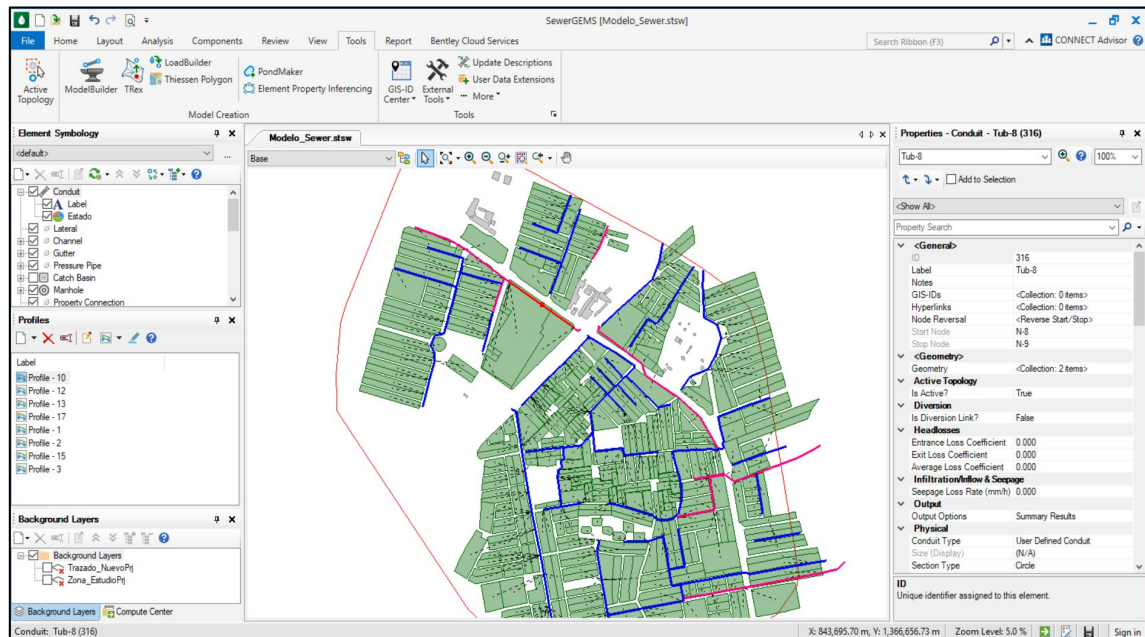


Ilustración 21 Migración de los datos recolectados al modelo.

Fuente: SewerGems V8i.

4.8.3 Componentes

Típicamente, la información que conforma los modelos hidráulicos de los sistemas de alcantarillado se agrupa de acuerdo con las siguientes categorías: información topológica, de topografía y aporte de caudales.

4.8.4 Construcción del modelo hidráulico.

La construcción del modelo se encuentra relacionada con las características físicas de los componentes que se diseñaran, los cuales permiten la recolección y el transporte de las aguas, tales como tuberías, pozos de inspección, descargas, aliviaderos y canales. Para la obtención de la información topológica se realizó una revisión de todo el sistema, donde se determinaron a partir de la topografía y de un catastro completo de las características del sistema de alcantarillado los sentidos de flujo, cotas rasantes cotas bateas, material de la tubería y demás condiciones que permitan caracterizar la red en estudio y así permitir la construcción del modelo dentro del programa.

4.8.5 Transito hidráulico de los caudales en redes de alcantarillado

Como es de conocimiento, las hojas de cálculo tradicionales transitan los caudales a través de las tuberías de alcantarillado aplicando la metodología del flujo uniforme, pero últimamente gracias al avance de la tecnología se ha venido estableciendo una forma de modelación más adecuada a las condiciones hidráulicas que en realidad se presentan en un sistema de alcantarillado como es la de permitir desarrollar un algoritmo que permita de manera real establecer la variación del flujo en canales abiertos y esta es mediante el análisis del flujo gradualmente variado.

Este es el caso del software utilizado, denominado SewerGEMS V8i en donde el balance de energía incluso en el caso de **flujo gradualmente variado**, la solución sigue siendo una cuestión de equilibrar la energía entre los dos extremos de un segmento de tubería.

La ecuación de energía en lo que respecta a cada extremo de un segmento es la siguiente (tenga en cuenta que las presiones de ambos extremos son cero, ya que es un flujo de superficie libre):

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + H_l$$

Dónde:

Z_1 =Gradiente hidráulico en el extremo aguas arriba del segmento (m)

V_1 =Velocidad en el extremo aguas arriba (m/s)

Z_2 =Gradiente hidráulico en el extremo inferior del segmento (m)

V_2 =Velocidad en el extremo inferior (m/s)

H_f = Pérdidas debidas a la fricción las otras perdidas se asumen como cero (m)

g = Aceleración gravitacional constante (9,8 m/s²)

La pérdida por fricción se calcula sobre la base de la tasa media de pérdida por fricción a lo largo del segmento y la longitud del segmento. Esta relación es la siguiente:

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + H_f$$

Dónde:

H_f = Pérdida a través del segmento (m, m)

S_{avg} = pendiente media de fricción (m / m, m / pies)

S_1 = la pendiente de fricción en el extremo aguas arriba del segmento (m / m, m / ft)

S_2 = pendiente de fricción en el extremo inferior del segmento (m / m, m / pies)

Las condiciones en un extremo del segmento son conocidos a través de la topología o desde un paso de cálculo anterior. Como la pendiente de fricción es una función de la velocidad, lo cual es una función de la profundidad, la profundidad en el otro extremo del segmento se puede encontrar a través de la iteración. Hay dos métodos principales para esta solución iterativa, el método estándar de paso y el método de paso directo.

Debido a que genera mayor resolución dentro de la parte cambiante del perfil, el algoritmo de flujo por gravedad, los programas SewerCAD V8i y SewerGEMS V8i utilizan principalmente el método de paso directo para calcular perfiles de flujo gradualmente variado.

Lo anterior permite establecer una velocidad a la entrada "Velocity in" y a la salida "Velocity out", determinar los perfiles de flujo dentro de las tuberías y así establecer si se presentan resaltos hidráulicos y determinar claramente cuál es la caída requerida entre tramos.

Por otra parte, permite determinar el número de Froude y calcula de manera adecuada la fuerza tractiva del tramo lo que nos da una clara idea de lo realmente sucede dentro de las tuberías y en especial la hidráulica de interconexión en los pozos de cada uno de los tramos estudiados.

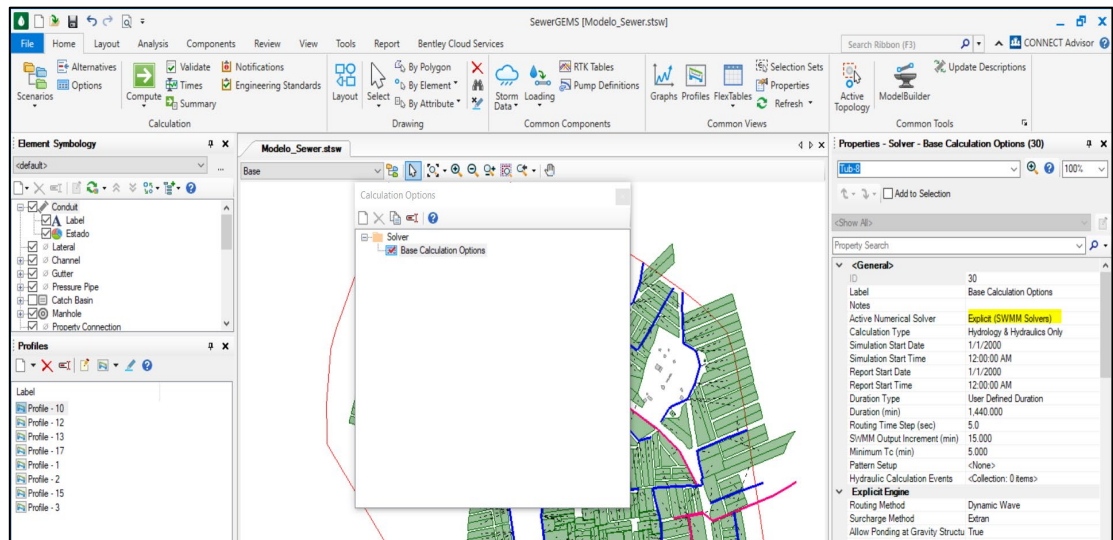
4.8.6 Configuración del modelo

Con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de los modelos elaborados, es necesario determinar el método de solución numérica que será utilizado para la

realización de los cálculos, así como ajustar los parámetros que permitan su convergencia final.

En el caso específico de esta modelación, se utilizó la ecuación de Manning para un flujo gradualmente variado.

Las simulaciones se realizan en el método “Explicit (SWMM Solvers),” permitiendo de esta forma que los caudales recorran todo el sistema



Uno de los principales beneficios que se obtienen por intermedio de la modelación hidráulica tiene que ver con la capacidad de reproducir con un alto grado de precisión, la respuesta del sistema frente a diversas condiciones operativas.

4.8.7 Representación de los SUDS en la modelación

El término LID (Low Impact Development), se refiere a sistemas y prácticas que usan o imitan procesos naturales que resultan en la infiltración, evapotranspiración o uso de aguas pluviales para proteger la calidad del agua y el hábitat acuático asociado. Los LID se utilizan para mantener y mejorar el régimen hidrológico anterior al desarrollo de las cuencas hidrográficas desarrolladas. Hay ocho tipos de controles LID que el software puede modelar.

- Las celdas de bioretención: Incluyen depresiones superficiales con vegetación cultivada en una mezcla de suelo diseñada colocada sobre un lecho de drenaje de grava. Proporcionan almacenamiento, infiltración y evaporación tanto de la lluvia directa como de la escorrentía capturada de las áreas circundantes.

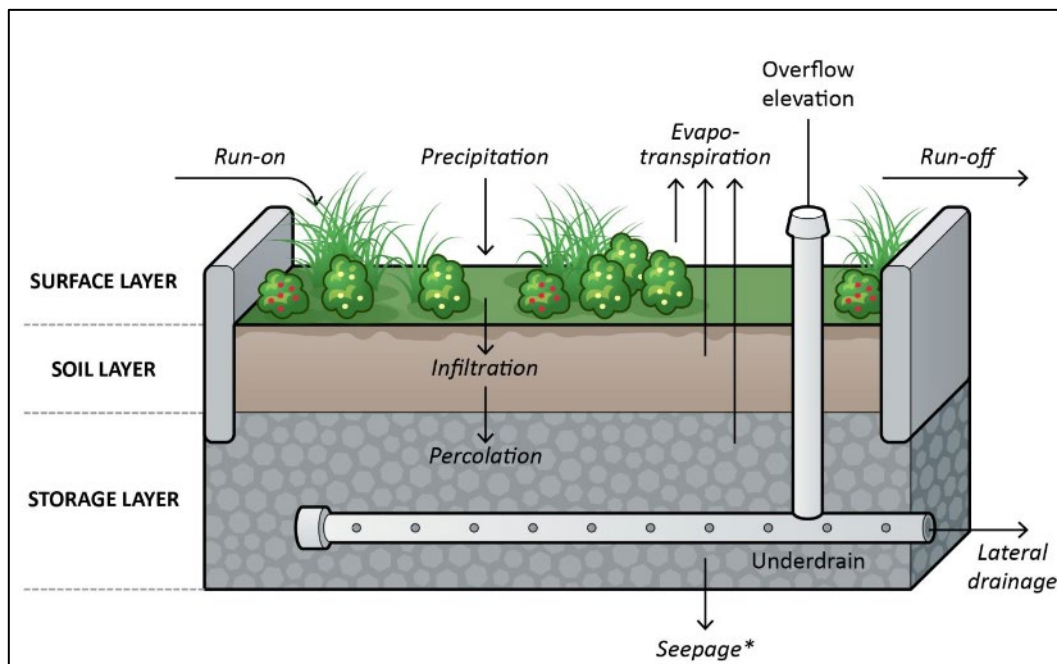


Ilustración 22 Celdas de Bioretención.

Fuente: PCSWMM. Tomado de: <https://support.chiwater.com/77701/lid-controls>

- Los jardines de lluvia: son similares a las celdas de bioretención con almacenamiento de superficie con vegetación y una capa de suelo diseñada sin una capa de drenaje subyacente.

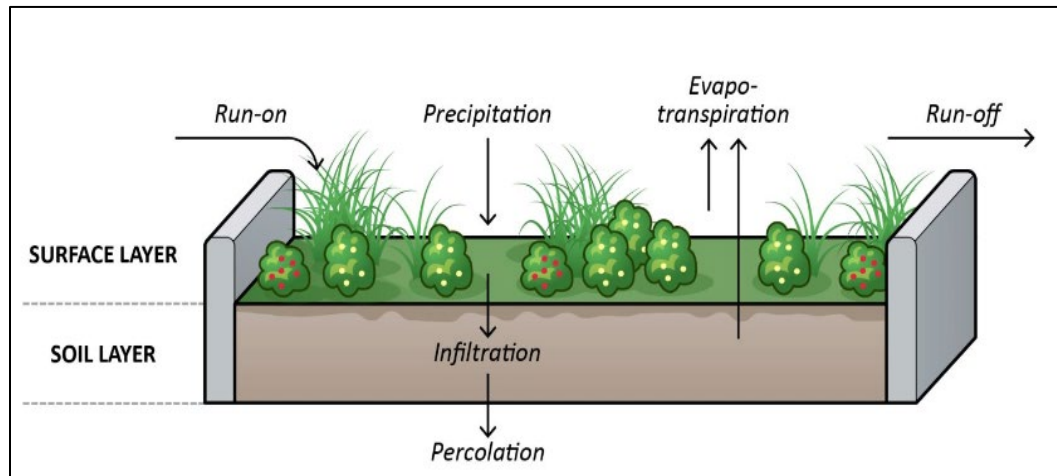


Ilustración 23 Jardines de lluvia

Fuente: PCSWMM. Tomado de: <https://support.chiwater.com/77701/lid-controls>

- Techos verdes: son otra variación de una celda de biorretención que presenta una capa de suelo generalmente poco profunda que se coloca sobre una capa de drenaje que recolecta y transporta el exceso de lluvia filtrada al sistema de drenaje del techo.

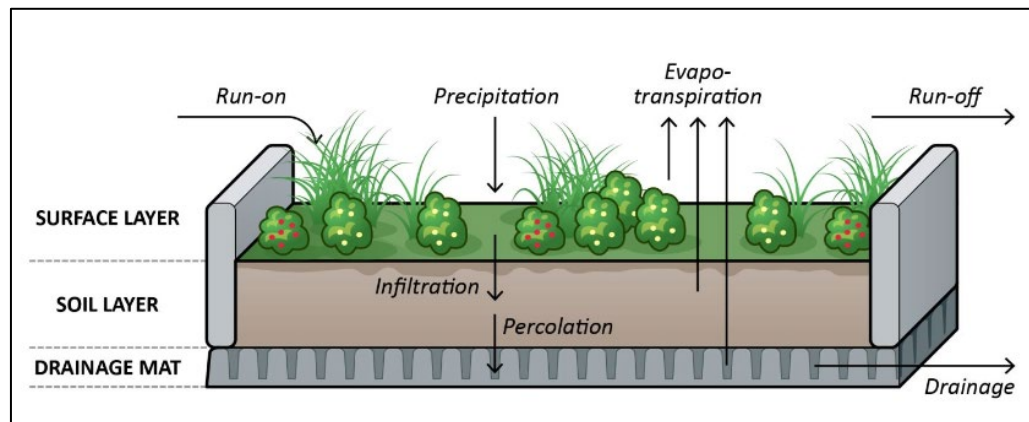


Ilustración 24 Techos verdes.

Fuente: PCSWMM. Tomado de: <https://support.chiwater.com/77701/lid-controls>

- Zanjas de infiltración: Son instalaciones de almacenamiento angostas sustentadas por medios granulares que interceptan la escorrentía de las áreas impermeables de la ladera superior. Su función de diseño está destinada a capturar y retener la escorrentía durante un período prolongado para mejorar la infiltración en el suelo nativo que se encuentra debajo.

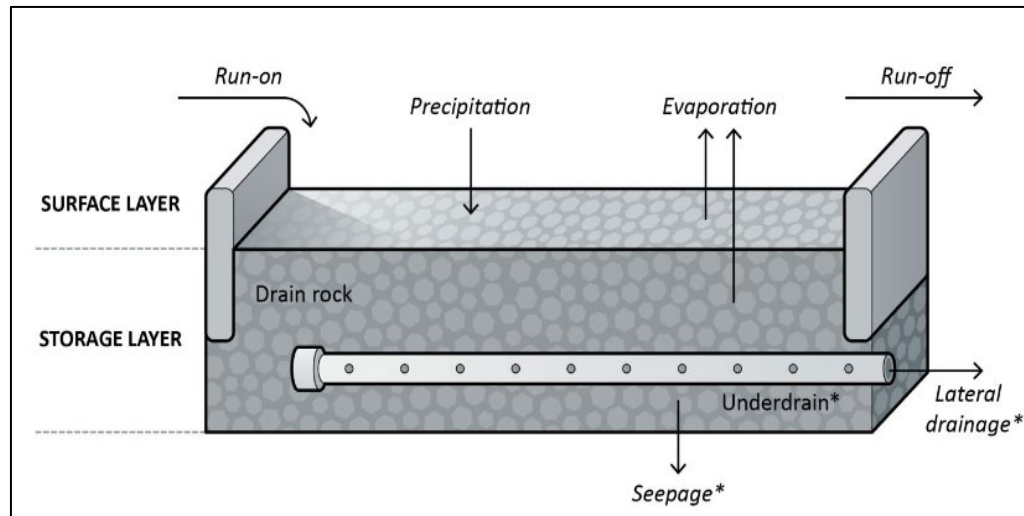


Ilustración 25 Zanjas de Infiltración.

Fuente: PCSWMM. Tomado de: <https://support.chiwater.com/77701/lid-controls>

- Sistemas de pavimento poroso continuo: Son áreas excavadas llenas de grava y pavimentadas con concreto poroso o mezcla asfáltica. Normalmente, toda la lluvia pasará inmediatamente a través del pavimento hacia la capa de almacenamiento de grava que se encuentra debajo, donde puede infiltrarse a tasas naturales en el suelo nativo. Los sistemas de adoquines de bloques consisten en bloques de adoquines impermeables colocados sobre un lecho de arena o gravilla con una capa de almacenamiento de grava debajo. La lluvia se captura en los espacios abiertos entre los bloques y se transporta a la zona de almacenamiento y al suelo nativo debajo.

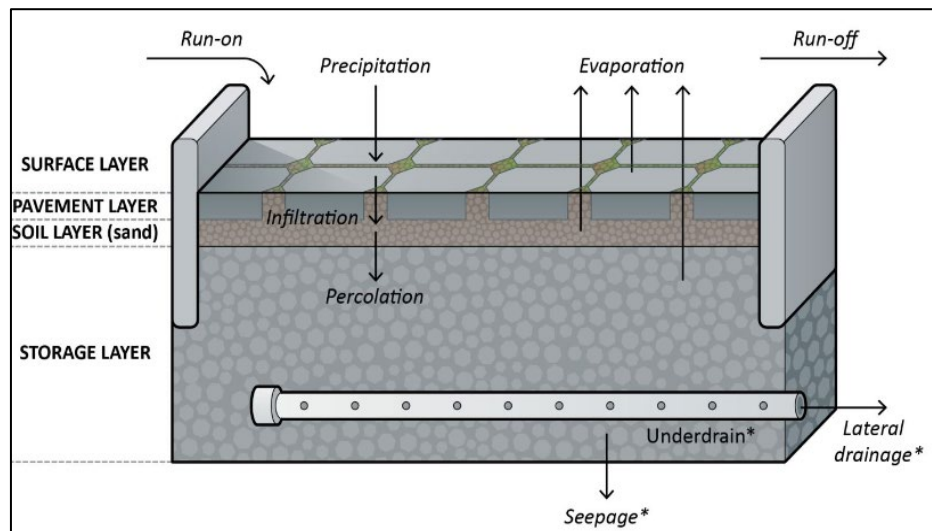


Ilustración 26 Sistemas de pavimento poroso continuo.

Fuente: PCSWMM. Tomado de: <https://support.chiwater.com/77701/lid-controls>

- Barriles de lluvia: Son recipientes que recolectan la escorrentía del techo durante las tormentas y pueden liberar o reutilizar el agua de lluvia durante los períodos secos.

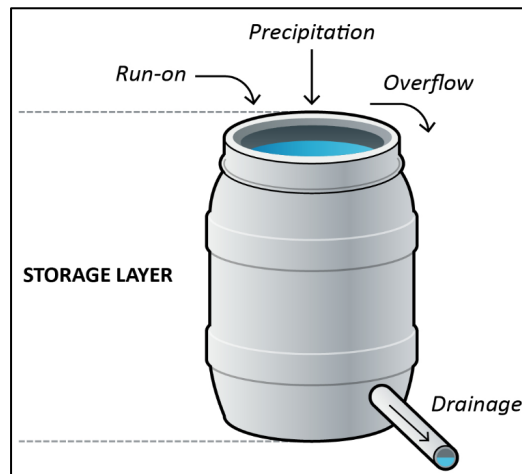


Ilustración 27 Barriles de Lluvia.

Fuente: PCSWMM. Tomado de: <https://support.chiwater.com/77701/lid-controls>

- Desconexión en la Azotea: Tiene bajantes que descargan en áreas ajardinadas y céspedes permeables en lugar de directamente en los desagües pluviales. También se puede usar para representar techos con desagües conectados directamente que se desbordan en áreas permeables.

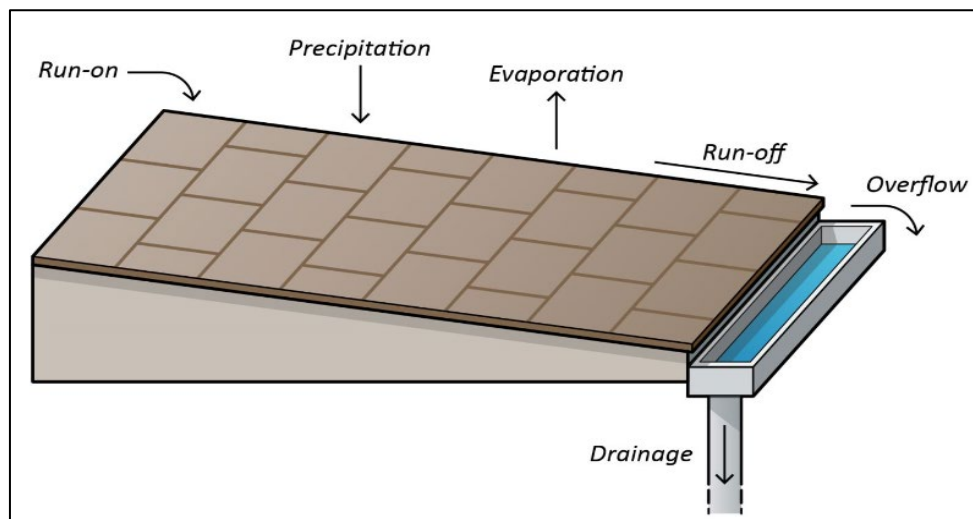


Ilustración 28 Desconexión en la Azotea.

Fuente: PCSWMM. Tomado de: <https://support.chiwater.com/77701/lid-controls>

- Los pantanos con vegetación: Son canales o áreas deprimidas con lados inclinados cubiertos de pasto y otra vegetación. Retrasan el transporte de la

escorrentía recolectada y permiten más tiempo para la evapotranspiración y la infiltración en el suelo nativo que se encuentra debajo.

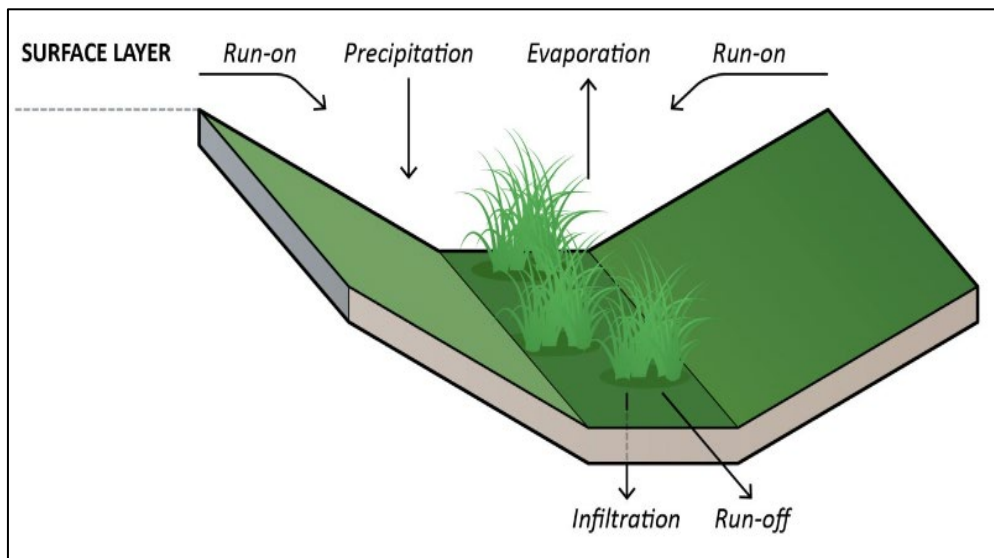


Ilustración 29 Pantanos con vegetación.

Fuente: PCSWMM. Tomado de: <https://support.chiwater.com/77701/lid-controls>

4.8.8 Implementación de los SUDS en la modelación

4.8.8.1 Representación de LID

Los SUDS están representados por una combinación de capas verticales cuyas propiedades se definen por unidad de área, esto permite que los SUDS del mismo diseño, pero con una cobertura de área diferente se coloquen fácilmente dentro de diferentes subcuencas de un área de estudio. Las distintas capas mencionadas consisten en:

- Capa Superficial: Superficie de suelo o pavimento que recibe lluvia directa de las áreas terrestres aguas arriba, almacena el exceso de flujo de entrada y genera una salida superficial que ingresa al sistema de drenaje aguas abajo.
- Capa de Pavimento: Es la capa de hormigón poroso o asfalto que se utiliza en los sistemas de pavimento poroso continuo, o son los bloques de adoquín y el material de relleno que se utilizan en los sistemas modulares.
- La capa de almacenamiento es un lecho de roca triturada o grava, que proporciona almacenamiento en celdas de bioretención, pavimento poroso y sistemas de zanjas de infiltración.
- El sistema de drenaje subterráneo transporta el agua fuera de la capa de almacenamiento de grava de las celdas de retención, los sistemas de pavimento poroso y las zanjas de infiltración hacia una cámara o tubería de salida común.

El rendimiento de los controles de los SUDS colocados en una subcuena se refleja en las tasas generales de escorrentía, infiltración y evaporación calculadas para la subcuena. En el software PCSWMM en el panel de estado, se puede revisar el resumen de rendimiento que proporciona un balance de agua general para cada control de SUDS colocado en cada subcuena. Los componentes de este balance de agua incluyen la entrada total, la infiltración, la evaporación, la escorrentía superficial, el flujo subterráneo y los volúmenes almacenados inicial y final (Computational Hydraulics International (CHI), 2023).

Mediante PCSWMM, hay dos enfoques diferentes para colocar controles LID o SUDS dentro de la subcuena:

- **Subcuena existente con LID:** Este primer enfoque permite colocar una combinación de LID en una subcuena, cada uno de los cuales trata una porción diferente de la escorrentía generada a partir de la fracción sin LID de la subcuena. Con esta opción, los LID de la subcuena actúan en paralelo; no es posible hacer que actúen en serie (es decir, hacer que el flujo de salida de un control de LID se convierta en el flujo de entrada a otro LID).

Después de la colocación del LID, es posible que sea necesario ajustar las propiedades de Porcentaje impermeable y Ancho de la subcuena para compensar la cantidad de área original de la subcuena que ahora ha sido reemplazada por los LID. Si la LID reemplaza todo el espacio permeable, el porcentaje de impermeabilidad será del 100 %. (Computational Hydraulics International (CHI), 2023)

- **Nueva subcuena LID:** El segundo enfoque permite que los controles LID se encadenen en serie y también permite que la escorrentía de varias subcuenas río arriba se dirija hacia la subcuena LID. Si estas subcuenas de LID se extraen de las subcuenas existentes, entonces, una vez más, puede ser necesario algún ajuste del porcentaje de impermeabilidad, el ancho y también las propiedades del área de este último. Además, cada vez que un LID ocupa toda la subcuena, los valores asignados a las propiedades estándar de la superficie de la subcuena (como impermeabilidad, pendiente, rugosidad, etc.) se anulan por los que pertenecen a la unidad LID.

Normalmente, tanto los desagües superficiales como los desagües de las unidades LID se dirigen a la misma ubicación de desagüe asignada a la subcuena principal. Sin embargo, se puede optar por devolver todo el flujo de salida del LID al área anterior de la subcuena principal y/o enrutar el flujo de salida del drenaje a una salida separada designada. (Computational Hydraulics International (CHI), 2023)

4.8.8.2 Utilización de LID

El uso de controles LID dentro de un proyecto SWMM es un proceso de dos fases que:

- Crea un conjunto de controles LID independientes de la escala que se pueden implementar en toda el área de estudio.
- Asigna cualquier mezcla deseada y el tamaño de estos controles a las subcuencas seleccionadas.

Cuando se agregan LID a una subcuenca, la propiedad del área de la subcuenca es el área total de la subcuenca (tanto las partes sin LID como con LID), mientras que los parámetros Porcentaje de impermeabilidad y Ancho se aplican solo a la parte sin LID de la subcuenca.

Para implementar la primera fase, seleccione la categoría Controles LID del panel Proyecto I para agregar, editar o eliminar objetos de control LID individuales. El Editor de control LID se utiliza para editar las propiedades de las diversas capas de componentes que comprenden cada objeto de control LID.

Para la segunda fase, para cada subcuenca que utilizará LID, se debe asignar el LID a la subcuenca en el panel Atributos en Controles LID en Atributos. Este editor se usa para agregar o eliminar controles LID individuales de la subcuenca. Para cada control agregado, se usa el Editor de uso de LID para especificar el tamaño del control y qué fracción del área impermeable de la subcuenca captura. (Computational Hydraulics International (CHI), 2023)

4.8.8.3 Resultados LID

El rendimiento de los controles LID colocados en una subcuenca se refleja en las tasas generales de escorrentía, infiltración y evaporación calculadas para la subcuenca, según lo informado normalmente por SWMM.

El Resumen de rendimiento de LID en el panel Estado proporciona un balance de agua general para cada control de LID colocado en cada subcuenca. Los componentes de este balance hídrico incluyen la entrada total (lluvia directa más la escorrentía capturada de la subcuenca, más la escorrentía de otras subcuencas), la infiltración (hacia el suelo nativo desde la capa inferior del LID), la evaporación, la escorrentía superficial, el flujo de drenaje y los volúmenes de almacenamiento inicial/final (contenido de agua al inicio/final de la simulación). Todos los valores se expresan en pulgadas (o mm) sobre el área de huella de la LID. (Computational Hydraulics International (CHI), 2023)

***** LID Performance Summary *****									
Subcatchment	LID Control	Total Inflow mm	Evap Loss mm	Infil Loss mm	Surface Outflow mm	Drain Outflow mm	Initial Storage mm	Final Storage mm	Continuity Error %
S3	RainwaterHarvesting	48835.81	0.00	0.00	5467.44	43658.36	300.00	28.83	-0.04
S4A	PermeablePavement	4394.57	1723.28	1440.46	1237.16	0.44	36.99	30.82	-0.01
S7	BioretentionArea	3800.89	1859.55	1382.71	589.75	0.00	92.51	83.40	-0.57

Ilustración 30 Resumen de rendimiento LID.

Fuente: PCSWMM 2023. Tomado de: (Computational Hydraulics International (CHI), 2023)

Respecto al archivo de informe LID, la serie temporal completa de tasas de flujo y niveles de humedad para un control LID seleccionado en una subcuenca determinada se puede escribir en un archivo de texto delimitado por tabulaciones, denominado archivo de informe detallado LID, para facilitar la visualización y la representación gráfica en un programa de hoja de cálculo. Este archivo puede crearse en el Editor de uso de LID y abrirse en el panel Gráfico después de ejecutar el modelo para analizar los resultados.

Para evaluar el desempeño general de LID en un modelo, el análisis de escenarios puede ser útil. Se recomienda crear un escenario de caso base sin implementación de LID. Además del caso base, se pueden configurar múltiples escenarios con varios controles y usos de LID. Una vez que se ejecuta el modelo, el balance de agua se puede comparar entre el caso base y los escenarios LID. Para obtener más información sobre cómo comparar los resultados del modelo, consulte Comparación de resultados de escenarios.

4.9 Metodología de selección de tipologías y trenes de SUDS

La selección del tipo SUDS y la formación del tren, incluyen un análisis del sitio de implementación para identificar las áreas potenciales en función de los objetivos establecidos e identificados en el sitio, así como de las limitaciones reconocidos en la implementación. De acuerdo con la investigación realizada por la universidad de los Andes y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), establecen una evaluación con cinco (5) criterios (mejoramiento de la calidad del agua, control de volúmenes de agua lluvia, amenidad, mantenimiento y costos). La metodología, comprende tres etapas principales: preselección de tipologías, evaluación de tipologías y determinación de trenes recomendados. (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

4.9.1 Preselección de tipologías

El proceso se lleva a cabo teniendo en cuenta la restricción del área y/o del lugar donde se van a implementar estas tipologías. Se debe escoger la ubicación más conveniente para cumplir los objetivos de los SUDS y adicional debe tenerse en cuenta características como la pendiente, la distancia al nivel freático, la tasa de infiltración del suelo, la distancia a cimientos y el tamaño del área disponible.

Tabla 4 Preselección de tipologías de SUDS de acuerdo con la selección de áreas potenciales.

Tipologías / Áreas potenciales	Tanques de almacenamiento	Zonas de bio-retención	Alcorques inundables	Cunetas verdes	Zanjas de infiltración	Cuenca seca de drenaje extendido	Pavimentos permeables
Parques		X		X	X	X	X
Plazas	X	X	X				X
Andenes	X	X	X				X
Vías (flujo vehicular bajo)	X				X		
Zonas comerciales	X	X	X				
Zonas industriales	X						
Zonas institucionales	X	X	X				
Separadores viales	X	X	X	X	X		X
Corredores verdes		X		X	X		X
Jardines domiciliarios	X	X					X
Parqueaderos	X	X	X		X		X

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

4.9.2 Metodología para la evaluación y selección de tipología de SUDS

A partir de las tipologías preseleccionadas en el sitio, se establecen cinco (5) criterios para la evaluación, los cuales tienen unos pesos porcentuales y al final se pondera el puntaje total de cada tipología y se identifica cuál es la más adecuada para el sitio de estudio.

- Mejoramiento de la calidad del agua: La escorrentía generada en los eventos de precipitación, puede transportar varios contaminantes a los sistemas de drenaje urbano y luego a los cuerpos de agua receptores. El diseño, la construcción y el mantenimiento adecuado de los SUDS

puede reducir eficazmente la concentración de varios contaminantes (sedimentos, nutrientes, metales, patógenos, entre otros).

Contaminantes como sedimentos y plomo son fácilmente removidos por mecanismos comunes como asentamiento y filtración. Por otra parte, contaminantes como nitrato, fósforo y algunos metales pesados son más difíciles de remover y generalmente requieren del uso de mecanismos químicos y biológicos como bacterias, algas, plantas acuáticas, materia orgánica y/o suelos. La clasificación de las tipologías de SUDS de acuerdo con la eficiencia de remoción de los contaminantes más comunes encontrados en el agua lluvia se presenta a continuación (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017).

Tabla 5 Calificación tipologías según eficiencia de remoción de contaminantes.

Contaminante \ Tipología	Nutrientes	Metales	Patógenos	Sedimentos	Aceites y grasas	Basura y escombros
Cunetas verdes	M ^{1,2,3,4}	B ²	B ¹	M ^{1,2,3,4}	M ¹	M ¹
Tanques de almacenamiento	Diseñados específicamente para reducción del volumen de escorrentía y retención, no para remoción de contaminantes. ¹					
Zonas de bio-retención	M ¹	B ^{2,4}	M ²	M ²	A ¹	A ¹
Alcorques inundables	M ⁴	B ^{2,4}	M ²	M ²	A ¹	A ¹
Cuenca seca de drenaje	B ^{2,3,4}	M ¹	A ¹	M ¹	M ¹	A ¹
Zanjas de infiltración	M ^{2,4}	A ¹	A ¹	A ¹	M ¹	A ¹
Pavimentos permeables	B ^{2,4}	M ¹	M ¹	A ¹	A ¹	M

A: Alta; 3 M: Media; 2 B: Baja; 1
¹Boston Water and Sewer Commission (2013)
²Leisenring, Clary, & Hobson (2014)
³Middlesex University (2003)
⁴Debo & Reese (2003)

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

Tabla 6 Procesos de filtración y sorción.

Tipología	Criterio de volumen	Filtración y sorción
Cunetas verdes		B
Tanques de almacenamiento		N
Zonas de bio-retención		A
Alcorques inundables		M
Cuenca seca de drenaje		B
Zanjas de infiltración		A
Pavimentos permeables		M

A: Alta: 3 M: Media: 2 B: Baja: 1
Fuente: adaptado de (Boston Water and Sewer Commission 2013)

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

- Control de volúmenes de agua lluvia: A medida que aumenta la superficie impermeable de una cuenca, se altera su hidrología natural, lo que resulta en un aumento de la escorrentía y la descarga máxima. También aumenta el transporte de contaminantes y aumenta el potencial de erosión de la cuenca receptora. Los tipos SUDS tienen el potencial de gestionar la escorrentía a través de procesos como la infiltración y la evapotranspiración. A continuación, se presenta una comparación cualitativa entre las diferentes tipologías respecto a su eficiencia en la reducción del volumen de escorrentía. (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017).

Tabla 7 Calificación de las tipologías según el control de volúmenes de agua lluvia.

Tipología	Criterio de volumen	Reducción volumen	Reducción descarga máxima
Cunetas verdes		B	B
Tanques de almacenamiento		M	M
Zonas de bio-retención		M	B
Alcorques inundables		B	B
Cuenca seca de drenaje		B	M
Zanjas de infiltración		A	A
Pavimentos permeables		A	M

A: Alta: 3 M: Media: 2 B: Baja: 1
Fuente: adaptado de (Boston Water and Sewer Commission 2013)

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

- Amenidad y conflictos de uso:

La amenidad es una característica de un lugar que se asocia con la percepción positiva general del área por parte de las personas que lo habitan. Está determinado por un conjunto de elementos relacionados con la calidad del paisaje, recreación, la seguridad, entre otros. De esta manera, la implementación de SUDS contribuye a la creación de diferentes grados de comodidad. (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017).

Tabla 8 Calificación tipologías según contribución a la amenidad.

Tipología	Cunetas verdes	Tanques de almacenamiento	Zonas de bio-retención	Alcorques inundables	Cuenca seca de drenaje	Zanjas de infiltración	Pavimentos permeables
Amenidad	M	N	A	M	A	N	N

A: Alta: 3 M: Media: 2 N: Nula: 0

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

La evaluación de conflictos de uso se hace a partir de dos factores, el primero corresponde a la probabilidad de que la implementación de un SUDS previamente elegido afecte el desempeño del sitio. El segundo factor consiste en evaluar si el método previamente elegido puede poner en peligro la seguridad de los usuarios del sitio. (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017).

Tabla 9 Calificación tipologías según conflictos de uso.

Tipología	Cunetas verdes	Tanques de almacenamiento	Zonas de bio-retención	Alcorques inundables	Cuenca seca de drenaje	Zanjas de infiltración	Pavimentos permeables
Conflicto de uso							
Actividades en el sitio	A	B	A	B	M	M	B
Seguridad (para los usuarios)	A	B	M	B	M	M	B

A: Alto: 1 M: Medio: 2 B: Bajo: 3

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

- **Mantenimiento:** Es uno de los factores más importantes para garantizar que los SUDS funcionen correctamente, debido a que influyen en el rendimiento del sistema. Por lo tanto, se debe tener en cuenta la frecuencia del mantenimiento, el equipo requerido y la persona responsable. Las actividades de mantenimiento incluyen actividades de frecuencia y complejidad variable y, por lo tanto, se definen como mantenimiento de rutina, periódico y correctivo. A continuación, se presenta una comparación entre las diferentes tipologías respecto al tipo de actividades y frecuencia (mensual, semestral, anual). Se evalúa el riesgo de colmatación del medio filtrante y si la estructura no tiene medio filtrante, el riesgo se califica como bajo, es medio si la estructura tiene una capa filtrante, pero incluye vegetación y es alto si no tiene vegetación. (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017).

Tabla 10 Calificación tipologías según frecuencia de mantenimiento.

Tipología	Cunetas verdes			Tanques de almacenamiento			Zonas de bio-retención			Alcorques inundables			Cuenca seca de drenaje			Zanjas de infiltración			Pavimentos permeables		
	M	S	A	M	S	A	M	S	A	M	S	A	M	S	A	M	S	A	M	S	A
Regular	5	3	0	3	0	0	4	2	0	4	3	0	5	2	0	4	3	0	3	0	0
Ocasional	0	4	2	0	3	1	0	5	5	0	3	4	0	4	0	0	2	1	1	0	1
Correctivo	0	2	8	0	1	5	0	1	8	0	1	8	0	1	6	0	0	8	0	2	6
Riesgo de colmatación	BAJO			BAJO			MEDIO			MEDIO			BAJO			ALTO			ALTO		
Total (Requerimientos)	BAJO			BAJO			ALTO			MEDIO			MEDIO			ALTO			ALTO		

M: Mensual S: Semestral A: Anual

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

- **Costos:** Se refiere a los costos de construcción y mantenimiento de las tipologías de SUDS. Los costos varían de acuerdo con las condiciones locales como el acceso al sitio, topografía, área, técnicas constructivas y obras adicionales requeridas. (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017).

Tabla 11 Calificación tipologías según costos.

TIPOLOGÍA \ COSTOS	Cunetas verdes	Tanques de almacenamiento	Zonas de bio-retención	Alcorques inundables	Cuenca seca de drenaje	Zanjas de infiltración	Pavimentos permeables
Costos de capital	B	M	M	M	M	M	A
Costos de mantenimiento	B	M	M	M	M	M	M

A: Alto: 1 M: Medio: 2 B: Bajo: 3

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

4.9.3 Conformación y evaluación de trenes de tratamiento

Esta metodología da como resultado el establecimiento de los trenes factibles y los procesos asociados a las tipologías integradas. Después de completar esta fase de la metodología, se debe continuar con el predimensionamiento de los tipos de trenes. En este sentido, se debe evaluar la capacidad y desempeño del tren seleccionado, lo que permite un análisis específico de si la configuración del tren obtenida cumple con los objetivos propuestos. Los procesos considerados para la conformación de trenes incluyen transporte, almacenamiento, infiltración y aprovechamiento de escorrentía para riego o para otros objetivos. Una vez se han establecido los trenes factibles, se define una calificación para cada uno de los mismos y los trenes recomendados corresponden a las configuraciones con los mayores puntajes. (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017).

Tabla 12 Puntajes asignados según el desempeño de cada tipología de SUDS para los cinco procesos evaluados.

TIPOLOGÍA \ PROCESOS	PROCESOS				
	Infiltración (I)	Almacenamiento / Detención (A)	Transporte (T)	Aprovechamiento de agua pluvial (R)	Aprovechamiento de agua pluvial para riego (Ri)
Cunetas verdes	2	1	5	0	0
Tanques de almacenamiento	0	5	0	5	5
Zonas de bio-retención	3	5	0	0	4
Alcorques inundables	3	5	0	0	4
Cuenca seca de drenaje	3	5	0	1	1
Zanjas de infiltración	5	3	3	0	0
Pavimentos permeables	5	3	0	0	0
Puntaje definido de 0 a 5					

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

5. RESULTADOS

5.1 Configuración Modelación computacional de la zona de estudio

A continuación, se presenta el sistema de tuberías y canales existente y las subcuencas que aportan al mismo. El módulo hidráulico del modelo está conformado por 44 conexiones (puntos en azul) que representan los pozos de inspección y sumideros. Así mismo, 39 conductos entreabiertos y cerrados (líneas en amarillo) que permiten modelar en el software los conductos subterráneos. Los emisarios finales (triángulos en rojo), los cuales identifican los puntos de descarga de los conductos en el canal Bogotá y en el río Pamplonita. Para el módulo hidrológico se crearon 474 subcuencas representando las áreas que aportan flujo de escorrentía al modelo construido.

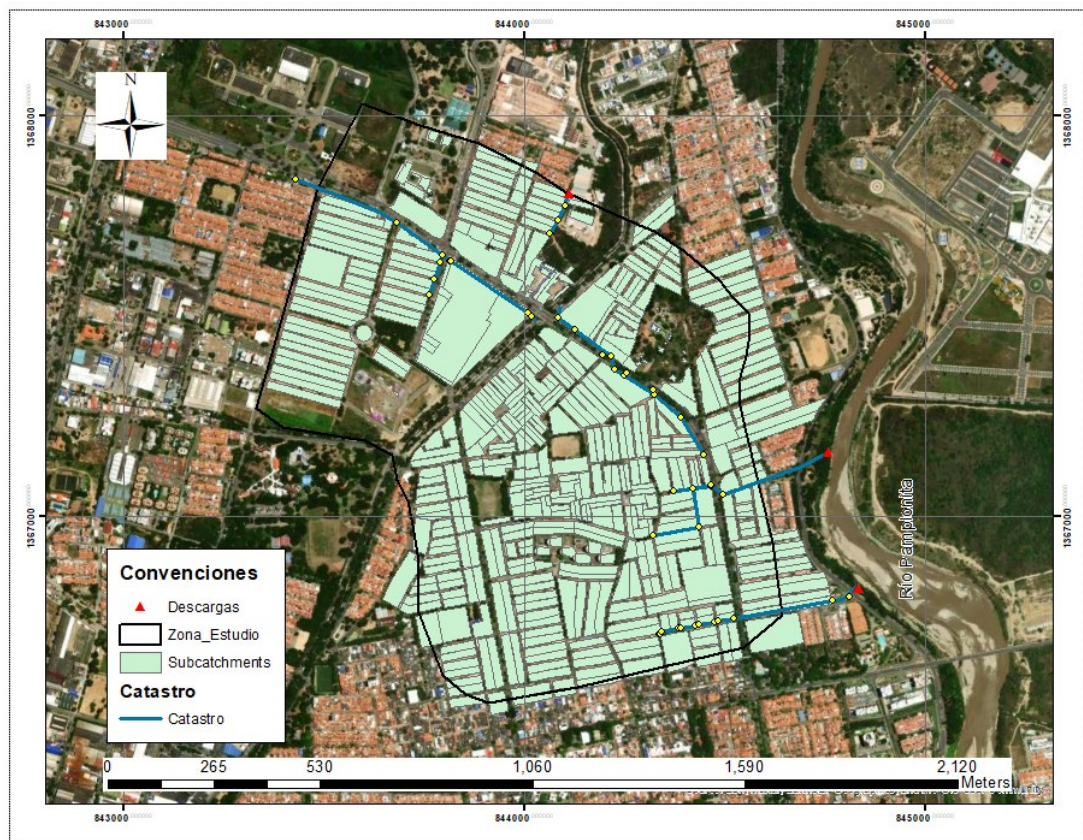


Ilustración 31 Modelo Zona de Estudio.

Fuente: Elaboración propia

El modelo hidrológico e hidráulico en dos dimensiones (2D) se obtuvo mediante la creación de conexiones, conductos y celdas 2D en el software PCSWMM. Está conformado por 97705 conexiones, 13443976 conductos, 16720 emisarios y 97705 celdas, que permitieron la modelación del flujo de escorrentía superficial en las vías y zonas permeables. Los emisarios en 2D se encuentran ubicados en la zona occidental y nororiental del modelo, debido que gran parte de la cuenca escurre hacia las vías de los barrios Tasajero y Niza.



Ilustración 32 Vista general modelo 2D.

Fuente: PCSWMM

Las zonas permeables se configuraron mediante una malla hexagonal con una resolución de 5 m, el tramo del canal Bogotá mediante una malla direccional de 3 m de resolución y las vías urbanas se representaron con una malla hexagonal de 2 m. Estos valores fueron obtenidos después de realizar diferentes pruebas del comportamiento de las soluciones numéricas del modelo computacional construido, donde se encontró que, para el tipo y tamaño de malla mencionadas anteriormente, y un paso de tiempo de 0.025 segundos, el error de continuidad y de enrutamiento da un valor inferior al 1% (valor aceptable para PCSWMM) en todas las simulaciones realizadas, ejecutándose en un tiempo máximo de simulación de 17 horas.



Ilustración 33 Mallas hexagonales creadas.
Fuente: PCSWMM

La interacción establecida entre el modelo unidimensional (1D) y bidimensional (2D) para la zona de estudio, lo cual fue posible mediante el enfoque de conexión directa del software PCSWMM, permitiendo representar como los conductos en 1D descargan el flujo transportado a una conexión 2D para que este sea conducido de forma bidimensional en la superficie libre del canal. Así mismo, se puede evidenciar que para modelar el flujo que transporta el canal Bogotá cuando pasa por debajo de los puentes existentes en la Av. Libertadores y la Av. Guaimaral, se creó una conexión directa entre el modelo 2D y un conducto 1D tipo Box Culvert con las dimensiones reales, lo cual permitió computacionalmente la interacción del flujo entre los tramos del canal. (Sánchez Tapiero Diego Iván, 2023)

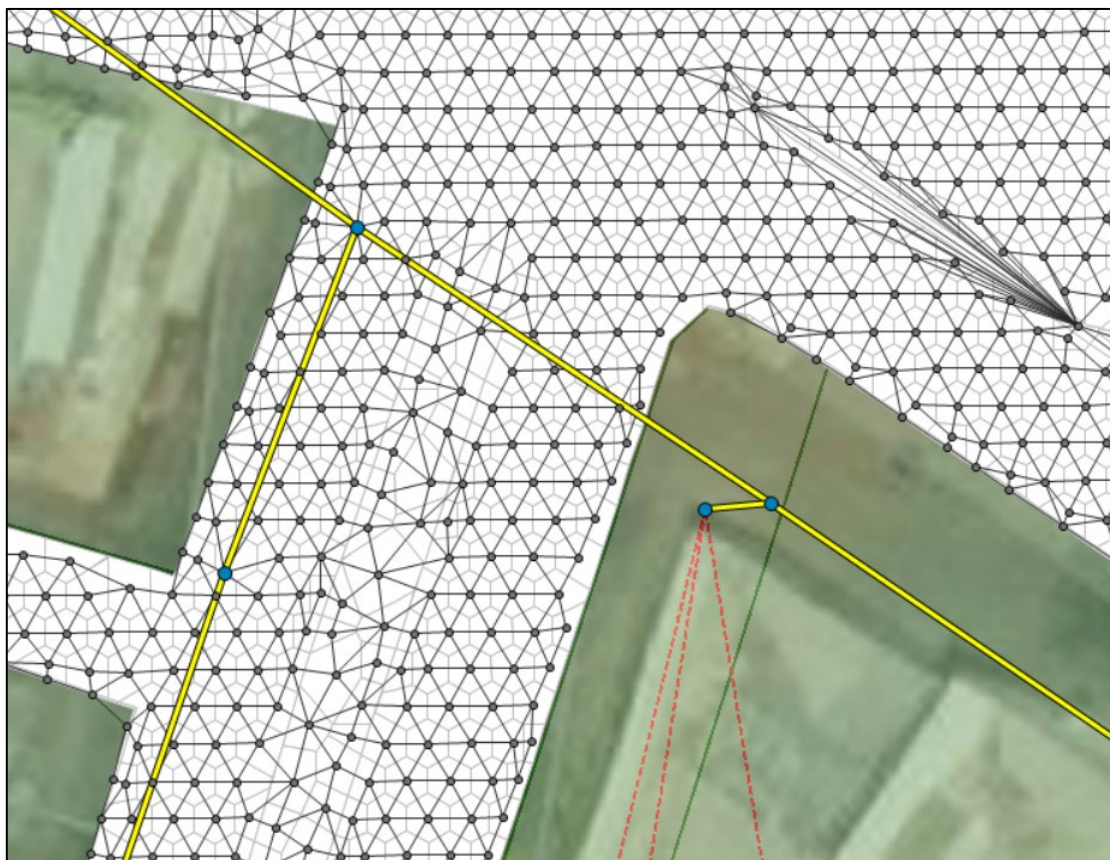


Ilustración 34 Conexión 1D con 2D.

Fuente: PCSWMM

5.2 Configuración lluvia de diseño

Como se mencionó anteriormente las IDF seleccionadas para la modelación de la inundación en la zona de estudio son las suministradas por el IDEAM para la estación meteorológica Aeropuerto Camilo Daza de la ciudad de Cúcuta. En la figura se puede observar que PCSWMM mediante la asignación de los parámetros (a, b, c), calculó los valores de la intensidad (mm/hr) en cada periodo de retorno para duraciones entre 5 minutos y 24 horas. Así mismo, se visualiza como el software crea las curvas con los valores obtenidos, presentando una forma similar a las suministradas por el IDEAM, lo cual permitió modelar los eventos históricos en la zona de estudio. (Sánchez Tapiero Diego Iván, 2023).

Con las curvas IDF incorporadas en el software se crean los hietogramas de tormenta para la zona de estudio, como se muestra a continuación. Estos fueron calculados mediante los parámetros (a, b, c) suministrados por las IDF, utilizando un r de 0.35, intervalos de 5 min y una duración de la tormenta de 3 horas para todos los periodos de retorno (2, 5, 10, 50 y 100 años) seleccionados para la modelación de las inundaciones en el área de estudio.

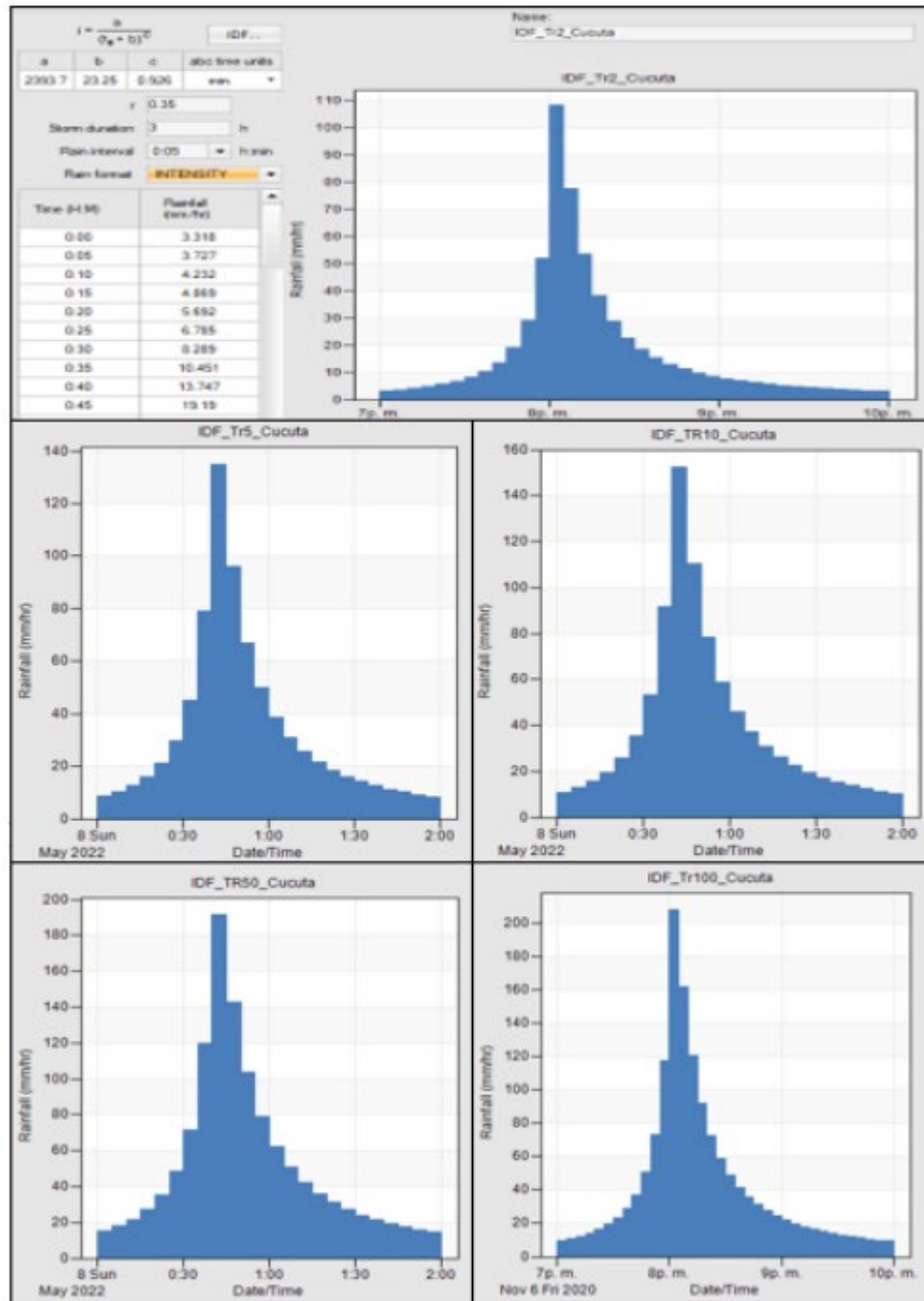


Ilustración 35 Hietogramas de tormenta para zona de estudio.

Fuente: PCSWMM.

5.3 Modelación Hidráulica e hidrológica

A continuación, se presentan los mapas de profundidad de flujo obtenidos para el periodo de retorno de 2 y 100 años, a partir de una precipitación con una duración de 3 horas.

Se evidencia que para el periodo de retorno de 2 años las alturas del agua en la mayoría del área no superan los 0.1 m, esto se debe a que las vías presentan flujo de escorrentía superficial con estas alturas por la falta de un sistema de drenaje subterráneo (tuberías), generando que el agua de lluvia sea transportada de forma superficial. Así mismo, se observa que, para el mapa de profundidad la avenida 12 Este, en un sector de la Av. Guaimaral y en algunas vías de los barrios Zulima y Ciudad Jardín las profundidades alcanzadas superan los 0.25 m hasta presentar en zonas valores superiores a los 0.5 m. Estas profundidades que se presentan en estos sectores son ocasionadas en gran parte por la topografía del terreno, como es el caso de la Av. 12 Este, ya que es una vía con una pendiente muy mínima y recibe la descarga de flujo de escorrentía de las calles cercanas, generando acumulación del agua en este sector y aumentando sus alturas. (Sánchez Tapiero Diego Iván, 2023).

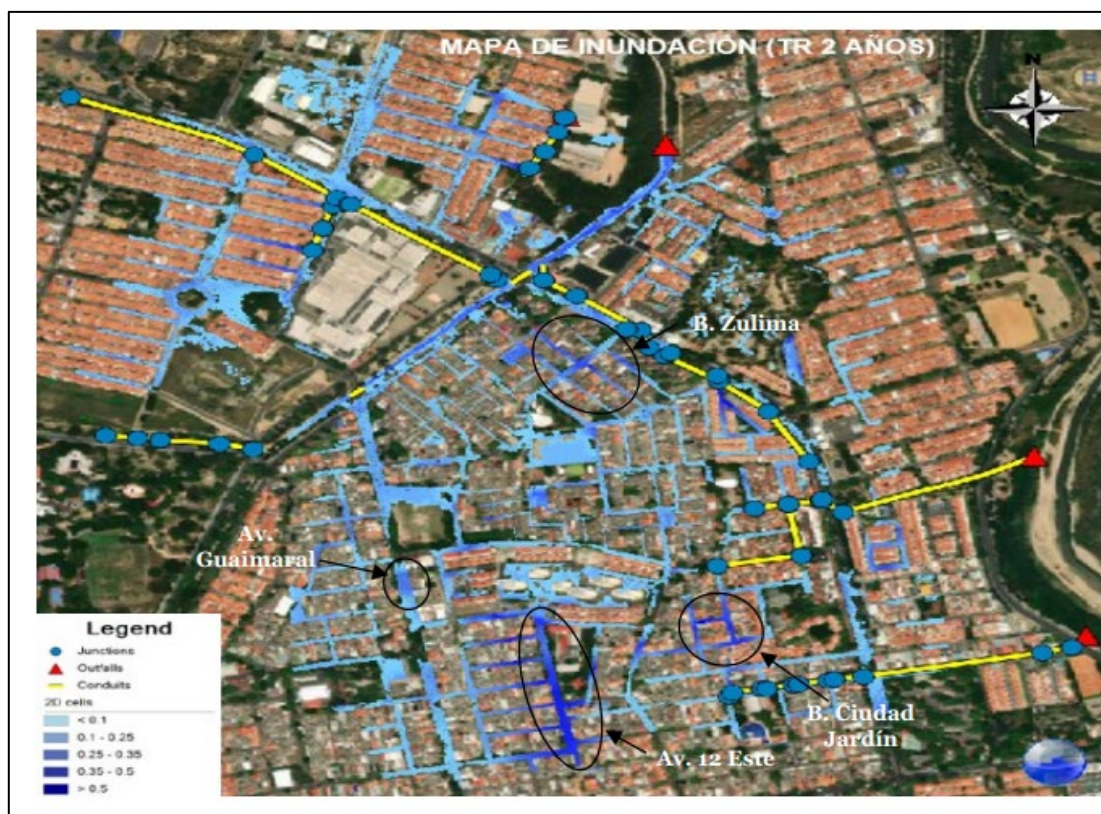


Ilustración 36 Mapa de inundación TR 2 Años.

Fuente: PCSWMM

A continuación, se muestra el mapa de profundidades para un periodo de retorno de 100 años, observándose el aumento de sectores con profundidades mayores, alcanzando valores de 0.85 m en algunos sectores, como es el caso de la Av. 12 Este y la Av. 14 Este entre calle 10ª Norte y 11ª Norte del barrio Ciudad Jardín,

generando una alta probabilidad de que una persona pueda sufrir accidentes por estas vías. En la Av. Guaimaral y en algunas calles del barrio Tasajero, Zulima y Prados del Norte, el modelo permite conocer que las profundidades son superiores a 0.25 m e inferiores a 0.5 m, pero en ciertos lugares de las vías por sus pendientes bajas toma valores muy cercanos al límite. (Sánchez Tapiero Diego Iván, 2023).



Ilustración 37 Mapa de inundación TR 100 Años.

Fuente: PCSWMM

Teniendo en cuenta lo anterior, se observa inundaciones con mayores profundidades en la parte central y occidental de la zona de estudio. Esto se debe a que la pendiente favorece al desplazamiento del flujo de escorrentía, acumulándose a medida que se va presentando la precipitación hasta llegar a las zonas con menor pendiente, lo cual produce que la profundidad del agua sea mayor. De igual forma, se evidencia que la zona central transporta el agua hacia el canal Bogotá mediante las Av. Libertadores y Guaimaral, lo cual hace que gran cantidad del flujo que escurre de las demás áreas se concentre en estos lugares, presentando inundaciones con velocidades y profundidades altas que afectan directamente a los peatones que transitan por ese lugar.

Por otra parte, los mapas que se mostraron anteriormente permiten ver la interacción de las zonas permeables en el área de estudio, las cuales presentan pequeños encharcamientos con profundidades menores a 0.10 m para todos los

periodos de retorno, que posteriormente son infiltrados por el tipo de suelo del lugar, representando la interacción hidrológica e hidráulica que tiene el modelo generado para la zona.(Sánchez Tapiero Diego Iván, 2023).

5.4 Optimización del sistema

El diseño de alcantarillado pluvial realizado para la inspección de la zona noroeste del Municipio de San José de Cúcuta, comprende la implementación de más descargas sobre el canal Bogotá y en el Río Pamplonita.

El trazado de las redes de alcantarillado pluvial se realizó con el fin de garantizar la recolección de todas las aguas lluvias de una manera eficaz, teniendo a favor las pendientes de las vías del municipio, además de no sobrecargar las redes. Buscando mantener el trazado que existe actualmente, sin embargo, independizándolo de la red sanitaria.

Luego de determinar el trazado adecuado de las redes de alcantarillado pluvial, se determinaron los caudales calculados, donde se determinó la topología, diámetros y cotas adecuados para cumplir todos los parámetros hidráulicos descritos en la resolución 0799 de 2021.

En la siguiente ilustración se muestra la ubicación espacial de la red de alcantarillado pluvial diseñada.

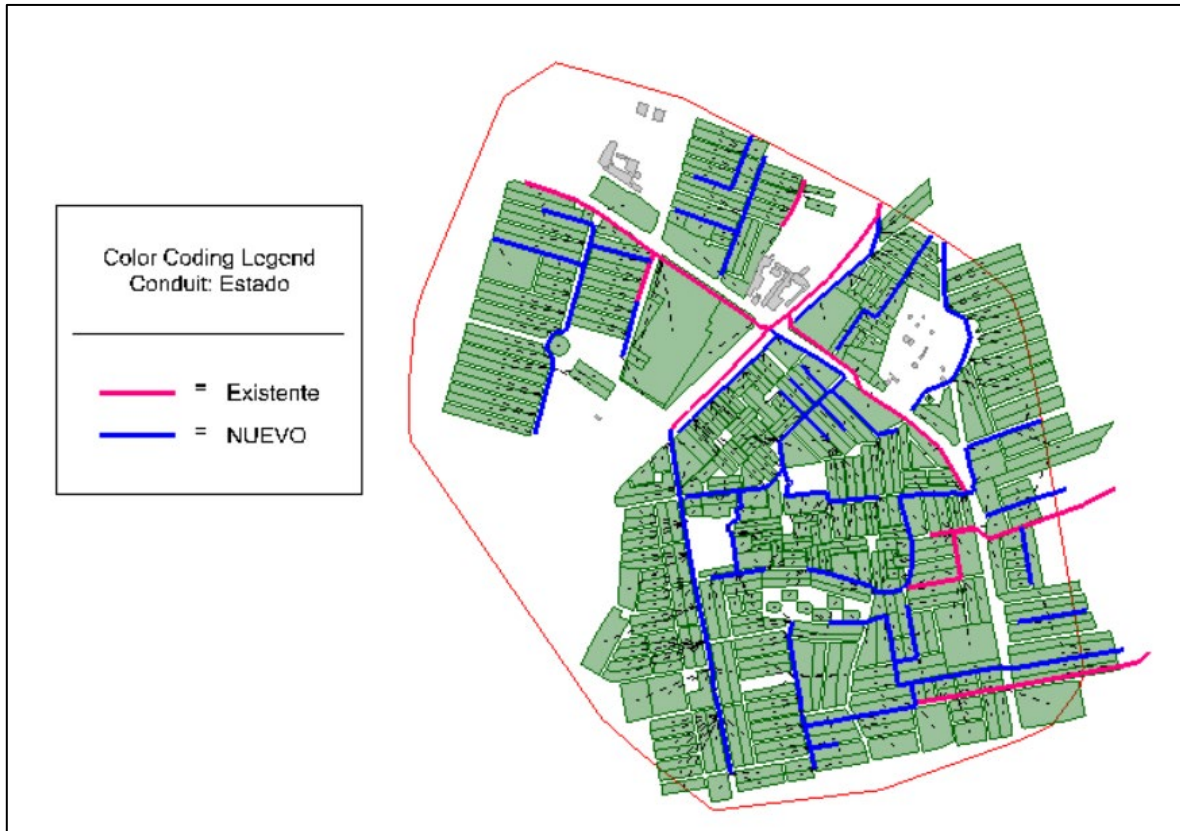


Ilustración 38 Red optimizada.
Fuente: SewerGems.

El diseño de la red optimizada se hizo teniendo en cuenta la topología propia de la zona de estudio, junto con las zonas donde se presentan mayores inundaciones. A partir de las redes proyectadas, se pudo evidenciar que los diámetros en las descargas y a lo largo de grandes tramos superan las 36" de diámetro, lo que implicaría realizar estructuras de conexión especiales para cada caso.

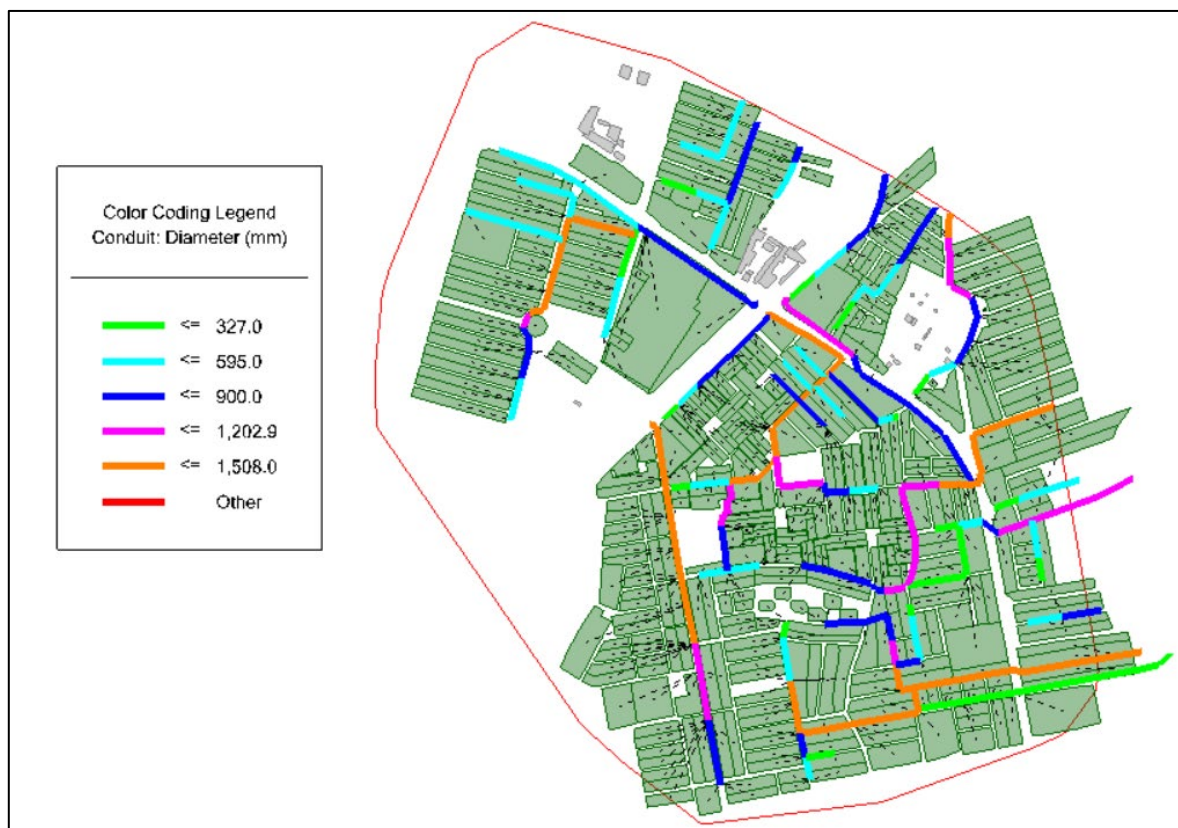


Ilustración 39 Diámetros Red optimizada.

Fuente: SewerGems.

Como se puede evidenciar aproximadamente 4.7 km superan las 36" de diámetro, por lo que se consideró complementar el sistema de alcantarillado convencional, con estructuras tipo SUDS, esto con el fin de aminorar los picos de crecienta, proteger los sistemas naturales como vías de drenaje, vegetación y suelos, minimizar la alteración del terreno y el área impermeable, aumentar la longitud de las rutas de flujo y los tiempos de viaje y personalizar el diseño del sitio según las necesidades de un sitio en particular, en lugar de simplemente confiar en prácticas tradicionalmente aceptadas.

Por lo tanto, a continuación, se describe la selección de tipologías SUDS, la cual se realizó teniendo en cuenta la metodología propuesta por la Universidad de Los Andes y La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP).

5.5 Selección de Tipologías

En la determinación de las tipologías factibles para el área de estudio, deben analizarse distintas variables para definir los espacios que se van a implementar con la tipología según las características del área disponible. Este proceso se lleva a

cabo de acuerdo con las restricciones físicas, así como las asociadas a las actividades que puedan tener espacio. De acuerdo con la guía técnica de diseño y construcción realizada por la Universidad de los Andes y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP), se resumen las tipologías de SUDS más recomendadas para diferentes zonas.

Tipologías Áreas potenciales	Tanques de almacenamiento	Zonas de bio-retención	Alcorques inundables	Cunetas verdes	Zanjas de infiltración	Cuenca seca de drenaje extendido	Pavimentos permeables
Parques		X		X	X	X	X
Plazas	X	X	X				X
Andenes	X	X	X				X
Vías (flujo vehicular bajo)	X				X		
Zonas comerciales	X	X	X				
Zonas industriales	X						
Zonas institucionales	X	X	X				
Separadores viales	X	X	X	X	X		X
Corredores verdes		X		X	X		X
Jardines domiciliarios	X	X					X
Parqueaderos	X	X	X		X		X

Identificar los sitios potenciales de los SUDS es de gran importancia ya que es muy conveniente ubicarlos en lugares importantes o prioritarios para el desarrollo de flujos, y debe haber suficiente espacio para el despliegue y operación adecuado para que su ubicación también reduzca el impacto negativo sobre los sistemas anteriores.

En el caso del área de estudio, se identifican los andenes como áreas potenciales, y de acuerdo con esto, coinciden cuatro tipologías de SUDS para estas áreas las cuales son Tanques de Almacenamiento, Zonas de bioretención, Alcorques y Pavimentos Permeables.

A su vez, el área potencial para la implementación de SUDS debe evaluarse de acuerdo con características como la pendiente, la distancia al nivel freático, la tasa de infiltración del suelo, la distancia a cimientos y el tamaño del área disponible.

Parámetro		CUNETAS VERDES	ZONAS DE BIO-RETENCIÓN	ALCORQUES INUNDABLES	CUENCA SECA DE DRENAJE	ZANJAS DE INFILTRACIÓN	PAVIMENTOS PERMEABLES
	Pendiente longitudinal (%)	Máx	10	10	10	15	5
Mín		1			1	1	0.5
Distancia al nivel freático (m)	Mín	1.5	1.8	1	3	3	3
Tasa de infiltración del suelo (mm/h)	Mín	13	7	7	7	7	13
Distancia a cimientos	Mín	4	6	2	6	6	6

Las tipologías se determinan sobre la base de procesos que son factibles en un área determinada y deben implementarse con los objetivos del proyecto. De acuerdo con la metodología proporcionada por la Universidad de los Andes, se enumeran las calificaciones asignadas a las tipologías, con cinco criterios (Mejoramiento de la calidad del agua, manejo de volúmenes, amenidad y conflictos de uso, mantenimiento y costos) donde se deben evaluar diferentes características, desde el punto de vista de su desempeño y operación y por lo tanto necesario evaluar de forma independiente las condiciones que representan.

- **Mejoramiento de la calidad del Agua:** El criterio de mejoramiento de la calidad del agua se valora numéricamente respecto a la eficiencia de remoción donde el número uno (1) equivale a bajo, dos (2) a medio y tres (3) a alto. Seguido de esto, se promedian los resultados y la tipología que presente la calificación más alta es la más eficiente en la remoción de contaminantes.

Tabla 13 Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según eficiencia de remoción de contaminantes.

TIPOLOGÍA CONTAMINANTE	ALCORQUES INUNDABLES	TANQUES DE ALMACENAMIENTO	PAVIMENTOS PERMEABLES	ZONAS DE BIO-RETENCIÓN
NUTRIENTES	2	0	1	2
METALES	1	0	2	1
PATÓGENOS	2	0	2	2
SEDIMENTOS	2	0	3	2
ACEITES Y GRASAS	3	0	3	3

TIPOLOGÍA \ CONTAMINANTE	ALCORQUES INUNDABLES	TANQUES DE ALMACENAMIENTO	PAVIMENTOS PERMEABLES	ZONAS DE BIO-RETENCIÓN
BASURA Y ESCOMBROS	3	0	2	3
FILTRACIÓN Y SORCIÓN	2	0	2	3
TOTAL	2.1	0.0	2.1	2.3

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

La escorrentía de aguas pluviales en áreas urbanas e industriales puede ser una fuente importante de contaminación; la inundación y la calidad química del agua, genera cambios hidrológicos e hidráulicos (físicos) en las cuencas hidrográficas asociadas con la urbanización, son reconocidas como grandes contribuyentes a la degradación del agua recibida, debido a que el aumento de la escorrentía causa erosión en las corrientes receptoras (Florez Luisa, 2018).

Teniendo en cuenta lo anterior, las zonas de bioretención permiten una mejor remoción de contaminantes, seguidas por los alcorques inundables y pavimentos permeables. La implementación de estas tipologías de SUDS, permiten reducir los problemas de contaminación y proteger los cuerpos de agua.

- **Manejo de volúmenes de Agua Lluvia:** La calificación numérica respecto a la eficiencia de reducción de volumen se efectúa en una escala de 1 a 3 en donde: uno (1) equivale a baja, dos (2) es media y tres (3) es alta. La tipología más eficiente en la reducción de escorrentía es la que presente la calificación más alta.

Tabla 14 Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según eficiencia de control de volumen de escorrentía.

TIPOLOGÍA \ CRITERIO DE CONTROL DE VOLUMEN	ALCORQUES INUNDABLES	TANQUES DE ALMACENAMIENTO	PAVIMENTOS PERMEABLES	ZONAS DE BIO-RETENCIÓN
REDUCCIÓN VOLUMEN	1	2	3	2
REDUCCIÓN DESCARGA MÁXIMA	1	2	2	1

TIPOLOGÍA CRITERIO DE CONTROL DE VOLUMEN	ALCORQUES INUNDABLES	TANQUES DE ALMACENAMIENTO	PAVIMENTOS PERMEABLES	ZONAS DE BIO-RETENCIÓN
	TOTAL	1.0	2.0	2.5

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

El incremento de las superficies impermeables en las cuencas produce cambios en la hidrología de las mismas, debido al aumento de los volúmenes de escorrentía y de los caudales pico, generando una mayor probabilidad de erosión en los cuerpos de agua receptores. De acuerdo con lo anterior, la tipología con mayor potencial para el manejo de volúmenes de agua son los pavimentos permeables.

- **Amenidad y conflictos de uso:** La calificación se realiza numéricamente respecto a la contribución de la amenidad donde tres (3) equivale a alta, dos (2) es media y uno (1) es nula, y respecto a los conflictos de uso donde tres (3) equivale a bajo, dos (2) es medio y uno (1) es alto. Al final de la matriz se promedian los resultados y la calificación más alta es la tipología con mayor contribución a la amenidad y con menores conflictos de uso.

Tabla 15 Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según contribución a la amenidad y conflictos de uso.

TIPOLOGÍA AMENIDAD CONFLICTO DE USO	ALCORQUES INUNDABLES	TANQUES DE ALMACENAMIENTO	PAVIMENTOS PERMEABLES	ZONAS DE BIO-RETENCIÓN
	Amenidad	2	0	0
Interferencia con las actividades en el sitio	3	3	3	1
Riesgo para la seguridad (usuarios)	3	3	3	2
TOTAL	2.5	1.5	1.5	2.3

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

La priorización de la amenidad en este ítem está asociada a los diálogos y reuniones que se tienen entre actores y entidades involucradas en el desarrollo de SUDS, por lo cual se valoraron servicios ambientales, sociales y

económicos(Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017).

Como se evidenció anteriormente, los SUDS que tienen mayor amenidad son los alcorques inundables y las zonas de bio-retención.

- **Mantenimiento:** La calificación sigue una escala numérica respecto a la frecuencia y al número de actividades de mantenimiento, donde tres (3) equivale a baja, dos (2) es media y uno (1) es alta. La calificación más alta corresponde a la tipología con menor mantenimiento.

Tabla 16 Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según frecuencia de mantenimiento.

TIPOLOGÍA	ALCORQUES INUNDABLES	TANQUES DE ALMACENAMIENTOS	PAVIMENTOS PERMEABLES	ZONAS DE BIO-RETENCIÓN
MANTENIMIENTO				
TOTAL	2.0	3.0	1.0	1.0

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

Los SUDS que necesitan un bajo mantenimiento son los tanques de almacenamiento, debido a que generalmente involucran limpieza o sustitución de los filtros y actividades de mantenimiento propias del sistema de bombeo según lo especifique el fabricante. Los que mayor mantenimiento necesitan son las zonas de bio-retención y los pavimentos permeables, todo teniendo en cuenta que la tasa de infiltración de estos empezara a disminuir significativamente con el paso del tiempo. Se recomienda tanto en el diseño como en la operación que las tasas de infiltración sean superiores a la intensidad de la lluvia (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017).

- **Costos:** En la matriz de evaluación de las tipologías seleccionadas, se realiza a partir de un rango de 1 a 3 en donde tres (3) equivale a bajo, dos (2) es medio y uno (1) es alto. Al final de la matriz se promedian los resultados y la tipología que presente la calificación más alta es la que representa menores costos.

Tabla 17 Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según costos.

TIPOLOGÍA \ COSTOS	ALCORQUES INUNDABLES	TANQUES DE ALMACENAMIENTOS	PAVIMENTOS PERMEABLES	ZONAS DE BIO-RETENCIÓN
	Costos de capital	2	2	1
Costos de mantenimiento	2	2	2	2
TOTAL	2.0	2.0	1.5	2.0

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

Para la sección de costos, los pavimentos permeables son los más costosos, respecto a los alcorques inundables, tanques de almacenamiento y zonas de bio-retención, los cuales tienen la misma calificación.

5.5.1 Evaluación de tipologías

Los criterios presentados previamente son evaluados y ponderados en la hoja "Evaluación de tipologías", tal y como se muestra a continuación.

Se presenta la matriz de evaluación que permite elegir la alternativa más adecuada a partir de la valoración de los criterios de selección y de los pesos establecidos.

Tabla 18 Criterios de selección para tipologías de SUDS.

CRITERIOS DE SELECCIÓN	PESO
Mejoramiento de calidad de agua	10%
Control de volúmenes	30%
Amenidad y conflictos de uso	15%
Mantenimiento	25%
Costos	20%
Suma (100%)	100%

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

A continuación, se presenta la matriz de evaluación final, en donde se puede evidenciar cual o cuales son la mejor opción de tipología de SUDS.

Tabla 19 Matriz final de selección de tipologías.

TIPOLOGÍA CRITERIOS DE SELECCIÓN	ALCORQUES INUNDABLES	TANQUES DE ALMACENAMIENTO	PAVIMENTOS PERMEABLES	ZONAS DE BIO-RETENCIÓN
Mejoramiento de calidad de agua	2.1	0.0	2.1	2.3
Control de volúmenes	1.0	2.0	2.5	1.5
Amenidad y conflictos de uso	2.5	1.5	1.5	2.3
Mantenimiento	2.0	3.0	1.0	1.0
Costos	2.0	2.0	1.5	2.0
TOTAL (máximo 5 puntos)	2.98	3.29	2.90	2.78

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

La tipología más adecuada de acuerdo con las condiciones propias del caso de estudio son los tanques de almacenamiento, los cuales tienen como función principal la retención del volumen de escorrentía generado en un evento de lluvia. El agua almacenada es evacuada o utilizada en actividades que no requieran calidad de agua potable (p.ej. riego de jardines, lavado de automóviles y limpieza de calles). Aunque, en un principio los tanques no se consideraban como una tipología de SUDS, su amplia implementación y fácil adaptación constructiva en áreas densamente urbanizadas han demostrado un impacto relevante en la reducción de caudales pico y volúmenes de escorrentía.

5.6 Tanques de Almacenamiento

La escorrentía que ingresa a esta tipología puede provenir directamente de sistemas de captación y conducción puntual (p.ej. techos, cubiertas y canaletas), o por medio de sistemas de drenaje convencional (p.ej. alcantarillas y sumideros).

El diseño de los tanques de almacenamiento puede variar de acuerdo con el objetivo para el cual estos están planeados. Existen variaciones del diseño, ya que la tipología debe adaptarse al entorno urbano en donde es implementada. Por ejemplo, en proyectos residenciales, en los cuales se quiere acoplar un tanque superficial de almacenamiento que capte la escorrentía de techos y bajantes de cada uno de los domicilios del proyecto, se diseñan los tanques según los requerimientos arquitectónicos de la estructura de cada domicilio. De esta manera, se puede constituir esta tipología como un elemento más del domicilio y no una estructura anexa a éste. Así mismo, el material con el cual están construidas estas tipologías puede cambiar según el costo, la ubicación (p.ej. superficial o subterráneo) y el uso posterior que se le dará al agua almacenada.

La implementación de tanques de almacenamiento en proyectos de SUDS es cada vez más frecuente debido a su flexibilidad en disposición y el potencial de

almacenamiento estas estructuras. Esta tipología puede implementarse al final de un tren de SUDS, pues, aunque no tiene la capacidad de mejorar la calidad del agua, sí puede retenerla y permitir su uso posterior. De esta manera, se puede garantizar una reducción en la cantidad de escorrentía y, además, un mejoramiento de la calidad de esta. Esta tipología puede limitar las inundaciones, reducir la cantidad de caudal de tormenta contaminado vertido a un curso de agua, Proporcionar un recurso para la reutilización y Formar parte de un sistema activo o de control en tiempo real.

Dentro de las funciones principales de los tanques de almacenamiento esta limitar las inundaciones, reducción de la cantidad de aguas pluviales contaminadas vertidas a un curso de agua, proporcionar un recurso para la reutilización y formar parte de un sistema activo o de control en tiempo real.

Un ejemplo es una nueva urbanización drenada por un sistema convencional de alcantarillado separado que vierte las aguas pluviales a un pequeño arroyo. Para reducir el riesgo de inundaciones en el arroyo, la descarga máxima del nuevo desarrollo debe limitarse a un valor bajo. Si se instala un tanque de almacenamiento, es probable que el flujo de salida se realice a través de un control de flujo, para operar a tasas de flujo más altas.

En la figura que se muestra a continuación, (a) se muestra la relación típica entre el caudal de entrada y el de salida para un caso en el que el caudal de salida está controlado y no varía significativamente con el nivel del agua. El volumen de agua almacenada para el caso ilustrado viene dado por el área sombreada. Cuando el caudal de salida supera al de entrada, el depósito se vacía.

También es útil considerar el papel hidráulico del almacenamiento en casos más generales en los que el caudal de salida puede variar significativamente. En la figura b se muestra una relación general entre el caudal de entrada y el de salida. En cualquier valor de tiempo, la diferencia entre las ordenadas de entrada y salida ($I_t - O_t$) da la tasa global a la que el agua en el almacenamiento está aumentando o disminuyendo.

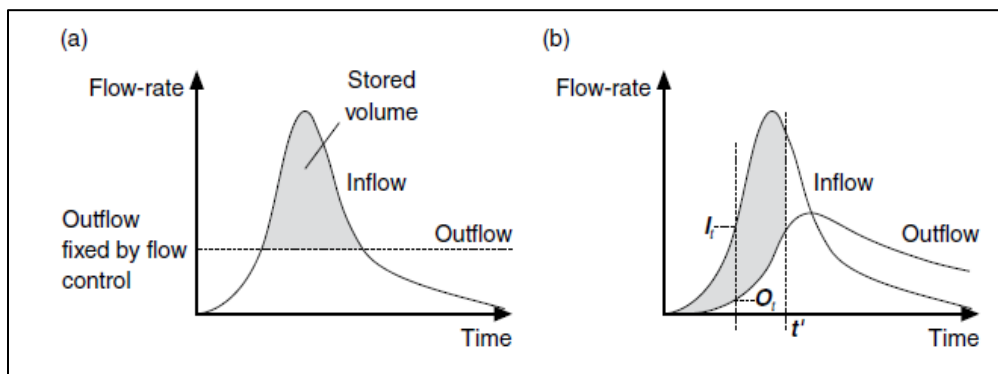


Ilustración 40 Almacenamiento: hidrogramas de entrada y salida.

Fuente: (Butler et al., 2018)

5.6.1 Diseño General

- **En línea**

Los tanques de retención en línea se construyen en serie con la red de drenaje urbano y se controlan mediante un regulador de caudal en su salida. El flujo pasa a través del tanque sin impedimentos hasta que la afluencia excede la capacidad de la salida. El exceso de caudal se almacena entonces en el tanque, haciendo que suba el nivel del agua. Se prevé un rebosadero de emergencia para hacer frente a caudales elevados. Cuando el caudal disminuye al final de la tormenta, el depósito empieza a vaciarse, normalmente por gravedad.

Una disposición común para un tanque en línea es una tubería sobredimensionada o una alcantarilla rectangular. Estos tanques de alcantarillado están provistos de un canal de tiempo seco (en sistemas combinados) o de bajo caudal para minimizar la deposición de sedimentos. También se proporcionan bancos con una pendiente positiva. Otra solución consiste en utilizar colectores más pequeños con varios barriles que funcionan en paralelo. Éstos proporcionan el almacenamiento necesario y tienen mejores características de autolimpieza.(Butler et al., 2018)

- **Fuera de línea**

Los depósitos fuera de línea se construyen en paralelo con el sistema de drenaje. Estos tipos de depósitos suelen estar diseñados para funcionar con un caudal predeterminado, controlado en la entrada del depósito. Se prevé un rebosadero de emergencia, como para el tanque en línea. El caudal se devuelve al sistema por gravedad o por bombeo, dependiendo de la configuración del sistema y de los niveles. Normalmente se utiliza una válvula de clapeta para los retornos por gravedad.

Los depósitos fuera de línea requieren menos volumen que los depósitos en línea para un rendimiento equivalente y, por tanto, menos espacio, pero los dispositivos de desbordamiento y estrangulación necesarios para desviar, regular y devolver los flujos suelen ser más complicados. Mantener la autolimpieza también es más difícil en este tipo de depósitos. Por eso es importante un mantenimiento regular.

5.6.2 Diseño Hidrológico

Los tanques de almacenamiento se diseñan a partir de un balance hidrológico de escorrentía mensual, que puede obtenerse por medio de tres variables resumidas a continuación. En primer lugar, se debe calcular la profundidad de lluvia promedio en la zona de intervención y el área de drenaje de la tipología. Para ello, se recomienda utilizar un registro histórico y calcular el promedio mensual multinacional de precipitación en la zona de implementación.

Tabla 20 Variables hidrológicas requeridas para el diseño de tanques de almacenamiento.

Variable	Definición
Área tributaria (Ad)	Área que aporta escorrentía a la superficie de drenaje del tanque
Coefficiente de escorrentía (C)	Coefficiente (de 0 a 1) que representa la permeabilidad de la superficie de drenaje
Precipitación (P)	Profundidad de precipitación de diseño específica para el sitio de implementación

Fuente: (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

En segundo lugar, se debe definir al área de drenaje del tanque. Dicha área deberá ser delimitada según aspectos topográficos y componentes del sistema de drenaje superficial como techos, canaletas, sumideros y demás elementos que puedan definir el flujo del agua. El coeficiente de escorrentía estará definido por el tipo de cobertura dentro del área de drenaje. De esta forma, se diferenciarán superficies (p. ej. concreto, tejas de barro, adoquines) que presenten diferentes condiciones de permeabilidad, con el fin de establecer la escorrentía real que es producida. (Universidad de los Andes & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017)

5.6.3 Diseño Hidráulico

El diseño hidráulico de un depósito o estanque que de servicio a una nueva urbanización suele implicar la limitación del caudal de salida para una tormenta concreta. Así, los criterios de diseño típicos son:

- El caudal de salida, que puede fijarse de varias maneras:
 - No superior a los valores estimados del emplazamiento sin urbanizar (o terreno sin urbanizar) (algo problemático, ya que es difícil predecir con exactitud los caudales de escorrentía de pequeñas cuencas sin urbanizar).
 - Un valor vinculado a la superficie del emplazamiento y a menudo especificado por la política de planificación nacional o local (por ejemplo, 4-6 L/s.ha).
 - La capacidad de la alcantarilla o del curso de agua aguas abajo.

-Tormenta de diseño: los depósitos más pequeños diseñados para mitigar inundaciones suelen diseñarse para tormentas con periodos de retorno de 30 años.

En el caso de grandes lagos, pueden especificarse periodos de retorno mucho más elevados.

Una estimación preliminar de las necesidades de volumen de almacenamiento para la atenuación de caudales punta (en depósitos en línea) puede obtenerse utilizando:

$$S = V_I - V_O$$

Donde S es el volumen de almacenamiento (m³), V_I es el volumen total de entrada (m³) y V_O es el volumen total de salida (m³).

La figura a continuación muestra un gráfico del volumen de entrada, V_I , en función de la duración de la tormenta, D , para un periodo de retorno determinado. También se ha representado el volumen de desagüe, V_O , suponiendo una descarga constante. La diferencia entre las ordenadas de las dos curvas da el almacenamiento, S , necesario para una tormenta de cualquier duración. El almacenamiento de diseño (S_{max}) es la diferencia máxima entre las curvas.

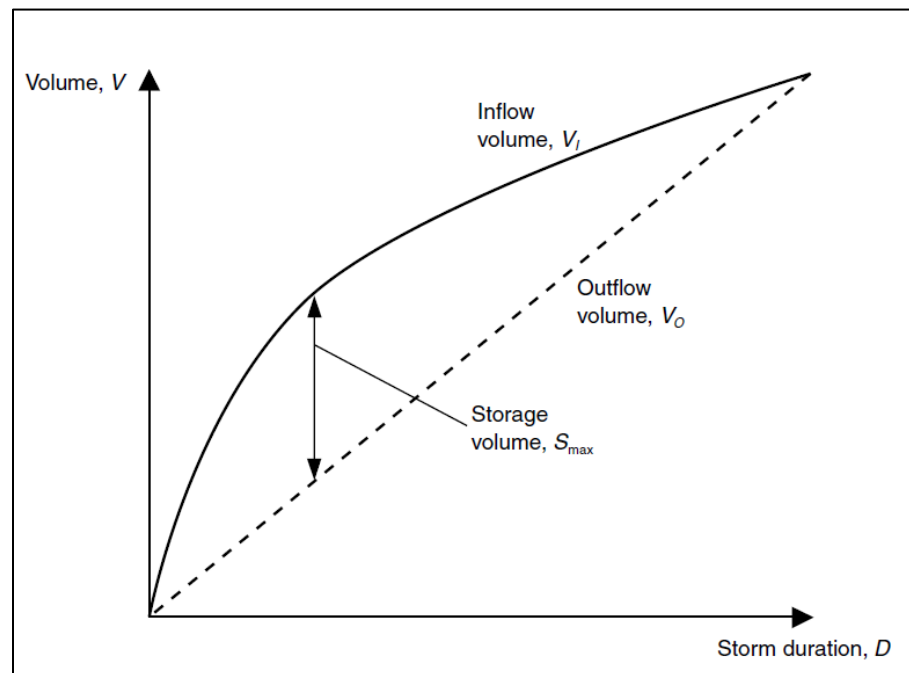


Ilustración 41 Volumen de almacenamiento en función de la duración de la tormenta.

Fuente: (Butler et al., 2018)

El cálculo de la relación entre el caudal de entrada y el de salida a medida que el flujo pasa por el almacenamiento se denomina enrutamiento.

La diferencia entre el caudal de entrada y el de salida es igual a la velocidad a la que el volumen de agua del almacenamiento cambia con el tiempo, o

$$I - O = \frac{dS}{dt}$$

donde I es el caudal de entrada (m³/s), O es el caudal de salida (m³/s), S es el volumen almacenado (m³) y t es el tiempo (s).

La aplicación más sencilla se muestra a continuación. En este caso, hay un flujo de salida controlado por un dispositivo como una presa, lo que da una relación simple entre O y H (altura del agua por encima de la cresta de la presa). S en este caso es el almacenamiento temporal, el volumen creado cuando hay un flujo de salida. La clave del método es que tanto O como S son funciones de H .

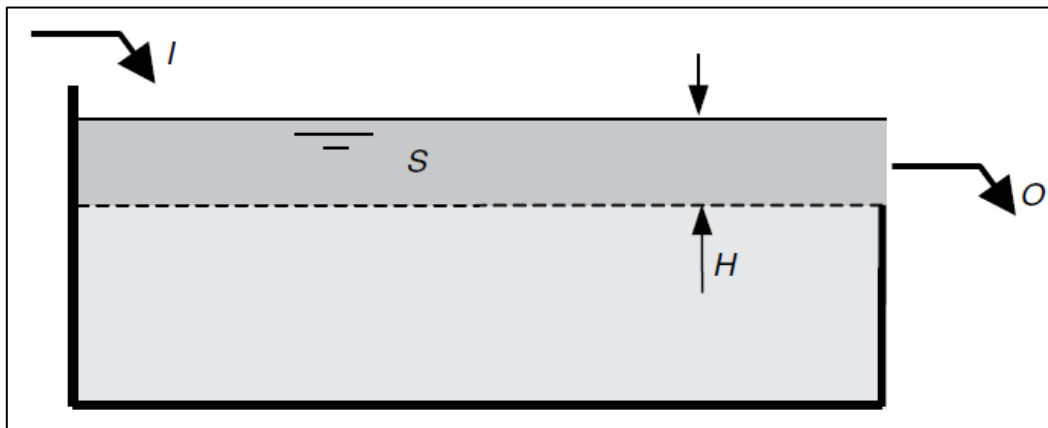


Ilustración 42 Aplicación sencilla del enrutamiento de grupos de niveles.

Fuente: (Butler et al., 2018)

$$\frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{S_2 - S_1}{\Delta t}$$

donde I_1 , O_1 , S_1 son el flujo de entrada, el flujo de salida y el volumen almacenado al inicio del paso de tiempo, respectivamente; I_2 , O_2 , S_2 son el flujo de entrada, el flujo de salida y el volumen almacenado al final del paso de tiempo, respectivamente; y Δt es el paso de tiempo.

Una aplicación típica es calcular el caudal de salida para valores conocidos de caudal de entrada. En cada paso de tiempo la incógnita será O_2 . Como O y S están relacionados a través de H , ponemos S_2 con O_2 en el lado izquierdo de la ecuación:

$$\frac{S_2}{\Delta t} + \frac{O_2}{2} = \frac{S_1}{\Delta t} - \frac{O_1}{2} + \frac{I_1 + I_2}{2}$$

Es conveniente tener el término $[(S/t)+(O/2)]$ en ambos lados, por lo que lo reordenamos a:

$$\left[\frac{S_2}{\Delta t} + \frac{O_2}{2} \right] = \left[\frac{S_1}{\Delta t} + \frac{O_1}{2} \right] - O_1 + \frac{I_1 + I_2}{2}$$

Ahora se tiene que incorporar la forma en que tanto O como S varían con H. La mejor forma de hacerlo es crear una relación entre $[(S/t)+(O/2)]$ y O (basada en las variaciones de O y S con H).

5.6.4 Dimensionamiento

En primera instancia se buscaron y se identificaron las zonas donde se pueden colocar estos tanques de almacenamiento y se colocaron en línea, es decir, los tanques de retención en línea se construyen en serie con la red de drenaje urbano y se controlan mediante un regulador de caudal en su salida. El flujo pasa a través del tanque sin impedimentos hasta que la afluencia excede la capacidad de la salida.



Ilustración 43 Ubicación de los tanques de tormenta.
Fuente: SewerGems.

El exceso de caudal se almacena entonces en el tanque, haciendo que suba el nivel del agua. Se prevé un rebosadero de emergencia para hacer frente a caudales elevados. Cuando el caudal disminuye al final de la tormenta, el depósito empieza a vaciarse, normalmente por gravedad.

A continuación, se presenta un esquema de cómo sería el funcionamiento de estos tanques de almacenamiento en línea, los cuales se conectan con el sistema de alcantarillado tradicional.

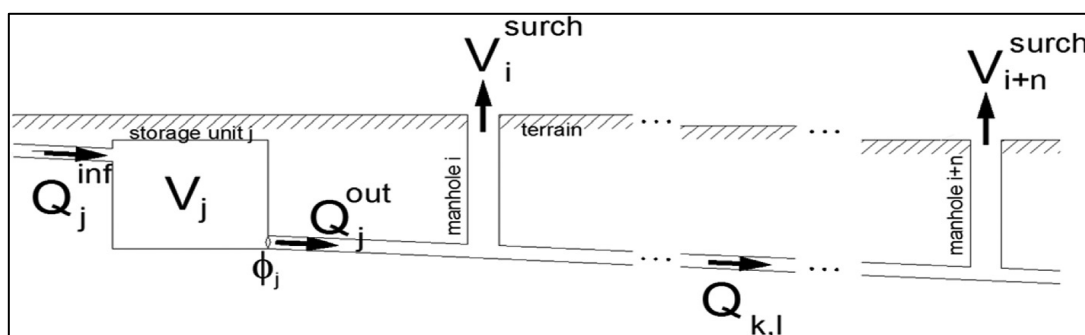


Ilustración 44 Sistema de conexión del tanque de almacenamiento y la red convencional.

Fuente: (Butler et al., 2018)

Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación, se presenta el procedimiento que se tuvo en cuenta para el dimensionamiento de los tanques de almacenamiento propuestos.

5.6.4.1 Tanque de Tormenta 1 (TT1)

A continuación, se describe el procedimiento de cálculo del tanque de tormenta.

Tabla 21 Datos de entrada

A	O	C _D	H _{disponible}	Δt	
Área disponible para el tanque	Caudal límite de salida	Coficiente de descarga	Altura máx disponible en sitio	Incremento de tiempo	
(m ²)	(L/s)	(-)	(m)	(h)	(s)
650	162.47	0.6	2.50	0.25	900

Fuente: Elaboración propia

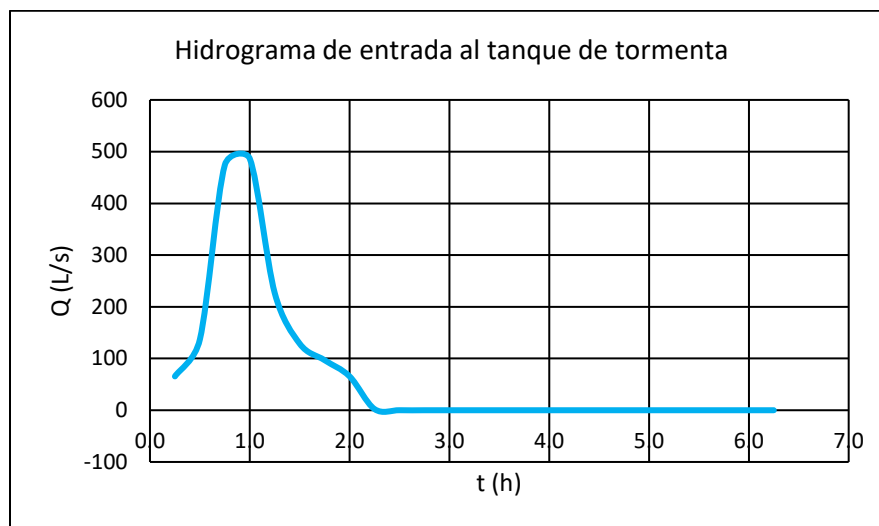
El hidrograma de entrada que se toma es el de la tubería a la cual se conectará el tanque de almacenamiento.

Tabla 22 Datos Hidrograma entrada.

Hidrograma de entrada		
i	t	Q
	(h)	(L/s)
1	0.25	65.43

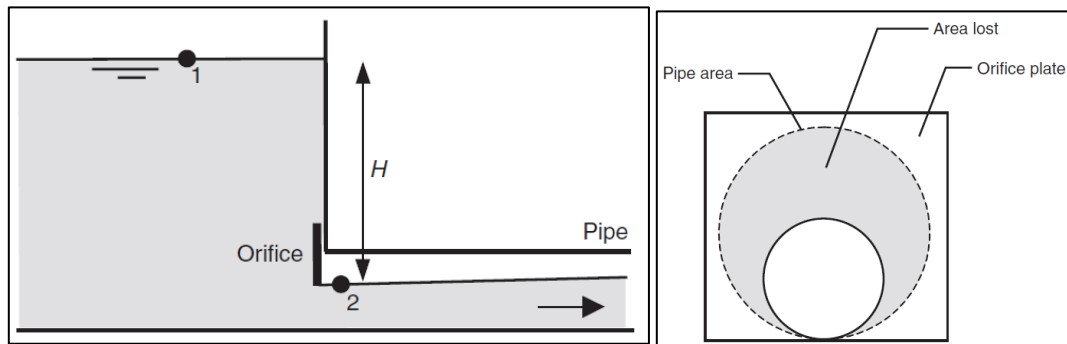
Hidrograma de entrada		
i	t	Q
	(h)	(L/s)
2	0.50	136.88
3	0.75	474.20
4	1.00	486.43
5	1.25	226.57
6	1.50	128.72
7	1.75	96.75
8	2.00	65.44
9	2.25	2.22
10	2.50	0.05
11	2.75	0.00
12	3.00	0.00
13	3.25	0.00
14	3.50	0.00
15	3.75	0.00
16	4.00	0.00
17	4.25	0.00
18	4.50	0.00
19	4.75	0.00
20	5.00	0.00
21	5.25	0.00
22	5.50	0.00
23	5.75	0.00
24	6.00	0.00
25	6.25	0.00

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 1 Hidrograma de entrada al tanque de tormenta.

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 2 Diseño tubería de salida del tanque.

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta lo anterior, se realiza el dimensionamiento de la tubería de salida del tanque de almacenamiento.

Tabla 23 Diámetros tubería de salida tanque de tormenta.

Conjunto discreto de diámetros comerciales para diseñar la tubería de salida del tanque de tormenta					
Material	d_{nom}	d_{int}	d_{ext}	e	$d_{int} - d_{disponibles}$
	[in]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
PVC Perfil Fort	6	145.00	160	7.50	
PVC Perfil Fort	8	182.00	200	9.00	
PVC Perfil Fort	10	227.00	250	11.50	
PVC Perfil Fort	12	284.00	315	15.50	
PVC Perfil Fort	14	327.00	355	14.00	
PVC Perfil Fort	16	362.00	400	19.00	48.20
PVC Perfil Fort	18	407.00	450	21.50	93.20
PVC Perfil Fort	20	452.00	500	24.00	138.20
PVC Perfil Loc	24	595.12	625	14.94	281.32
PVC Perfil Loc	27	671.01	710	19.50	357.21
PVC Perfil Loc	30	747.01	786	19.50	433.21
PVC Perfil Loc	33	823.09	860	18.46	509.29
PVC Perfil Loc	36	899.03	950	25.49	585.23
PVC Perfil Loc	39	974.98	1025	25.01	661.18
PVC Perfil Loc	42	1050.93	1101	25.04	737.13

Fuente: Elaboración propia

Valores requeridos		Valores asumidos			
A _o	D	D	A _o	d _{nom}	Material
Área del orificio	Diámetro requerido	Diámetro adoptado	Área del orificio	Diámetro comercial	
(m ²)	(mm)	(mm)	(m ²)	[in]	
0.0387	221.89	227.00	0.0405	10	PVC Perfil Fort

Para el diseño, se calcula la curva de almacenamiento con los volúmenes de entrada y de salida, de acuerdo con lo descrito anteriormente en el capítulo de diseño hidráulico.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{I - C_d A_o \sqrt{2gH}}{A} = f(H, t) ; H(t + \Delta t) = H(t) + \Delta t \cdot f(H, t)$$

$$O = C_d A_o \sqrt{2gH} ; I - O = \frac{dS}{dt}$$

Tabla 24 Cálculo de volúmenes de entrada y salida del tanque de tormenta 1.

1	2	3	4	5	6		
t	I	H (t)	O	f (H,t)	H (t+dt)	V _i = I x t	V _o = O x t
Tiempo	Caudal de entrada	Altura sobre la cresta	Caudal límite de salida	Cambio de H vs. t	Altura nueva sobre cresta	Volumen de entrada	Volumen de salida
(h)	(m ³ /s)	(m)	(m ³ /s)	(m/s)	(m)	(m ³)	(m ³)
0.25	0.06543	0.00	0.000	0.000101	0.09	58.89	0.00
0.50	0.13688	0.09	0.032	0.000161	0.24	246.38	58.26
0.75	0.47420	0.24	0.052	0.000649	0.82	1280.34	140.85
1.00	0.48643	0.82	0.097	0.000599	1.36	1751.15	350.50
1.25	0.22657	1.36	0.125	0.000156	1.50	1019.57	564.01
1.50	0.12872	1.50	0.132	-0.000004	1.49	695.09	710.88
1.75	0.09675	1.49	0.131	-0.000053	1.45	609.53	828.24
2.00	0.06544	1.45	0.129	-0.000098	1.36	471.17	931.21
2.25	0.00222	1.36	0.125	-0.000189	1.19	17.98	1015.07
2.50	0.00005	1.19	0.117	-0.000180	1.03	0.45	1054.70
2.75	0.00000	1.03	0.109	-0.000168	0.87	0.00	1078.03
3.00	0.00000	0.87	0.101	-0.000155	0.74	0.00	1086.13
3.25	0.00000	0.74	0.092	-0.000142	0.61	0.00	1078.91
3.50	0.00000	0.61	0.084	-0.000129	0.49	0.00	1056.22
3.75	0.00000	0.49	0.075	-0.000116	0.39	0.00	1017.85
4.00	0.00000	0.39	0.067	-0.000103	0.29	0.00	963.54

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos anteriores se calcula la profundidad útil, caudal de entrada máximo, caudal límite de salida y volumen útil:

$H_{m\acute{a}x}$ (m)	$O_{m\acute{a}x}$ (L/s)	$I_{m\acute{a}x}$ (m^3/s)	$O_{m\acute{a}x}$ (m^3/s)	$t_{m\acute{a}x}$ (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (m^3)
1.50	125.34	0.227	0.125	4500.00	455.55

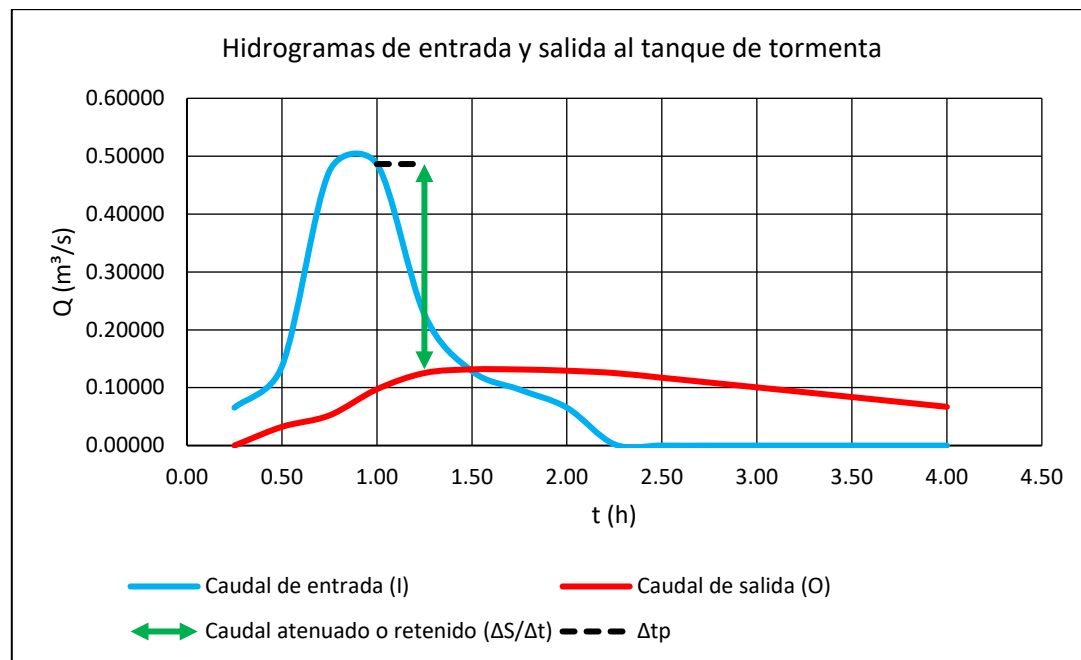
Con base en lo anterior y en el volumen de almacenamiento, se dimensiona el tanque de almacenamiento.

Tabla 25 Dimensionamiento del tanque.

Caudal pico atenuado o retenido		A	B	L	L/B
(m^3/s)	(L/s)	(m^2)	(m)	(m)	(-)
0.355	354.79	304.00	4.00	76.00	19.00

Fuente: Elaboración propia

Con el tanque de tormenta diseñado, se puede evidenciar que se aminora considerablemente el caudal, como se muestra a continuación.



Gráfica 3 Hidrograma de entrada y salida del tanque de tormenta 1.

Fuente: Elaboración propia

Para incluir este tanque de tormenta en la modelación, se realiza a partir de estructuras de control de pondaje, en la opción que se muestra a continuación:

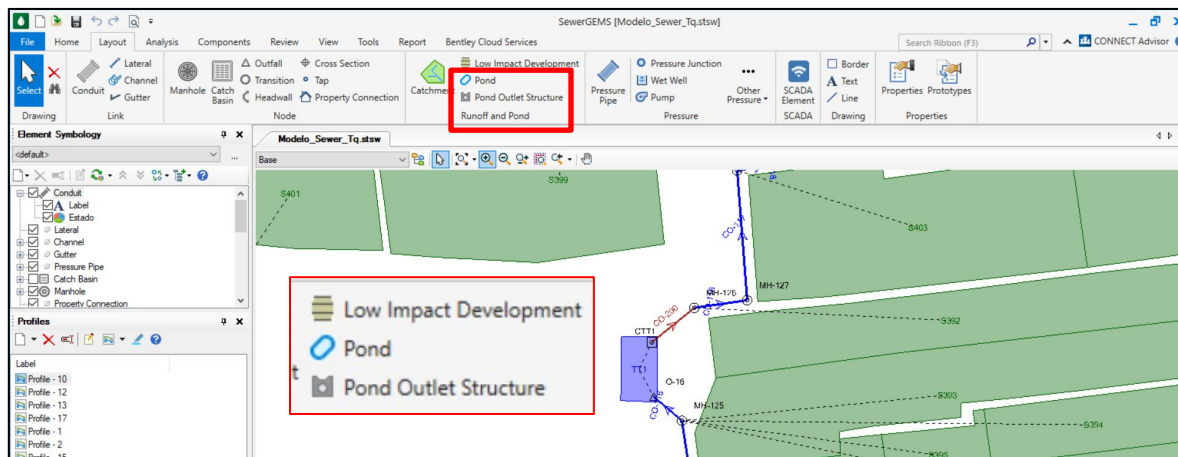


Ilustración 45 Implementación tanque de tormenta en la modelación.

Fuente: SewerGems

Una vez implantada esta estructura de control se debe colocar la curva de calibración del tanque, esto con el fin de regular y aminorar el caudal de entrada.

Tabla 26 Curva de calibración del Tanque.

Curva de calibración del tanque			
y/H	Elevación (Cota)	Área	Relación de vacío
[-]	[m]	[m ²]	[%]
0.0	279.28	304.00	100.0
0.2	279.85	304.00	100.0
0.4	280.42	304.00	100.0
0.6	280.99	304.00	100.0
0.8	281.57	304.00	100.0
1.0	282.14	304.00	100.0

Fuente: Elaboración propia

Partiendo de lo anterior, se evidencia el hidrograma de entrada y salida tal y como se mostró previamente.

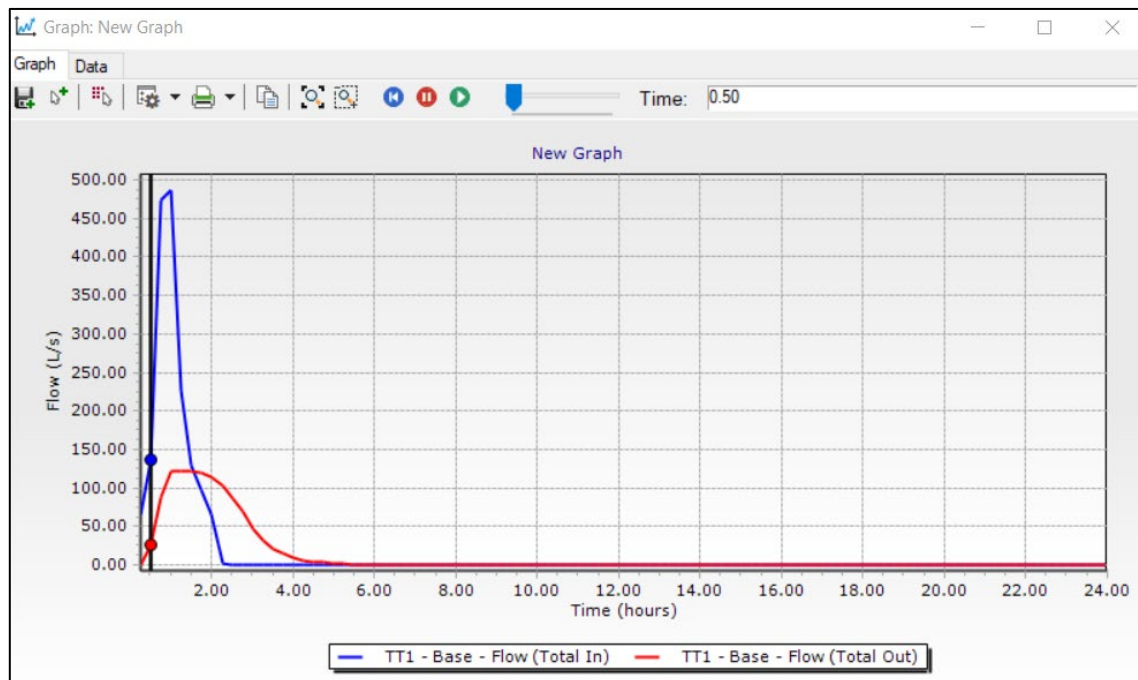


Ilustración 46 Hidrograma de entrada y salida en la modelación.

Fuente: SewerGems

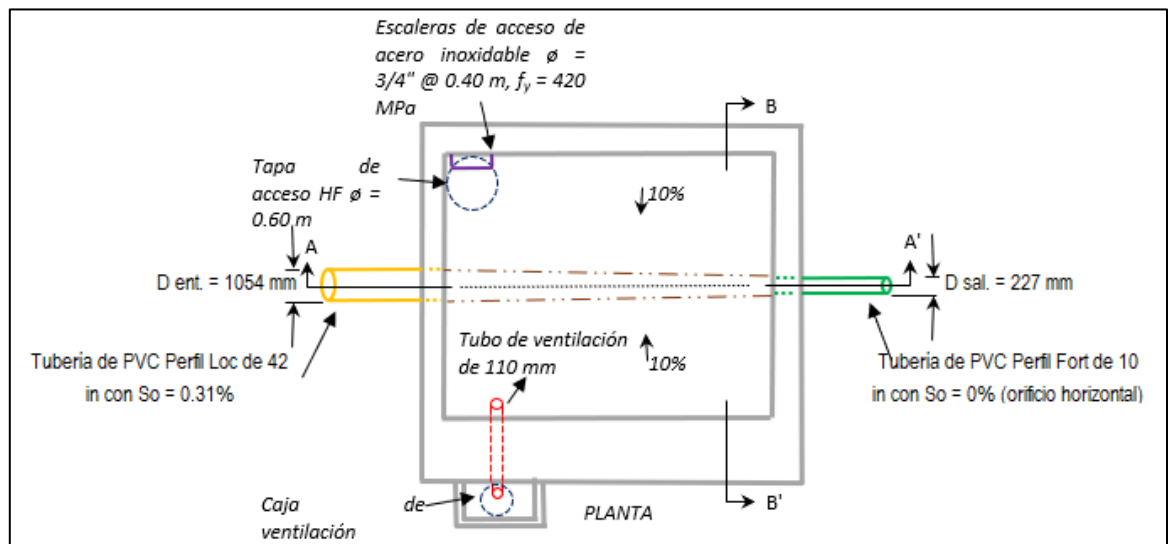


Ilustración 47 Diagrama del tanque de tormenta en planta.

Fuente: Elaboración propia

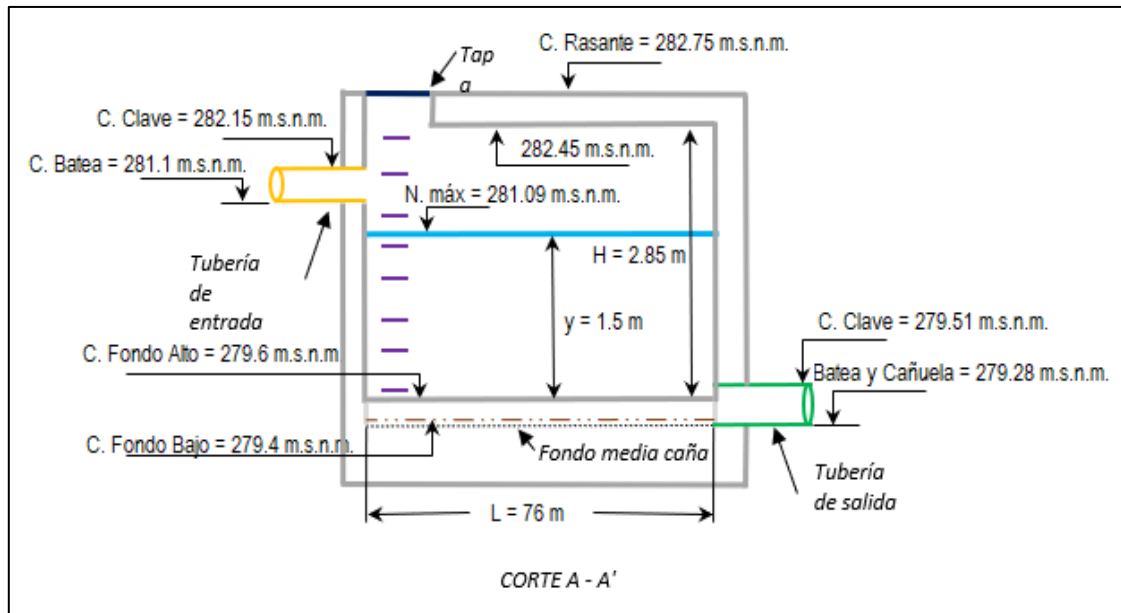


Ilustración 48 Vista en corte A-A' del tanque.

Fuente: Elaboración propia

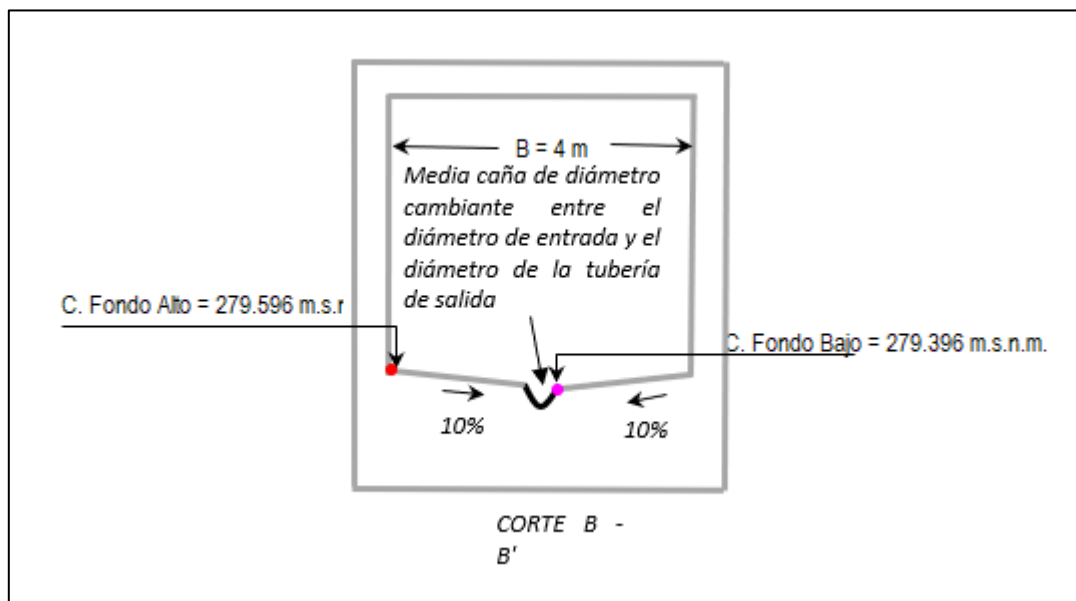


Ilustración 49 Vista en corte B-B' del tanque.

Fuente: Elaboración propia

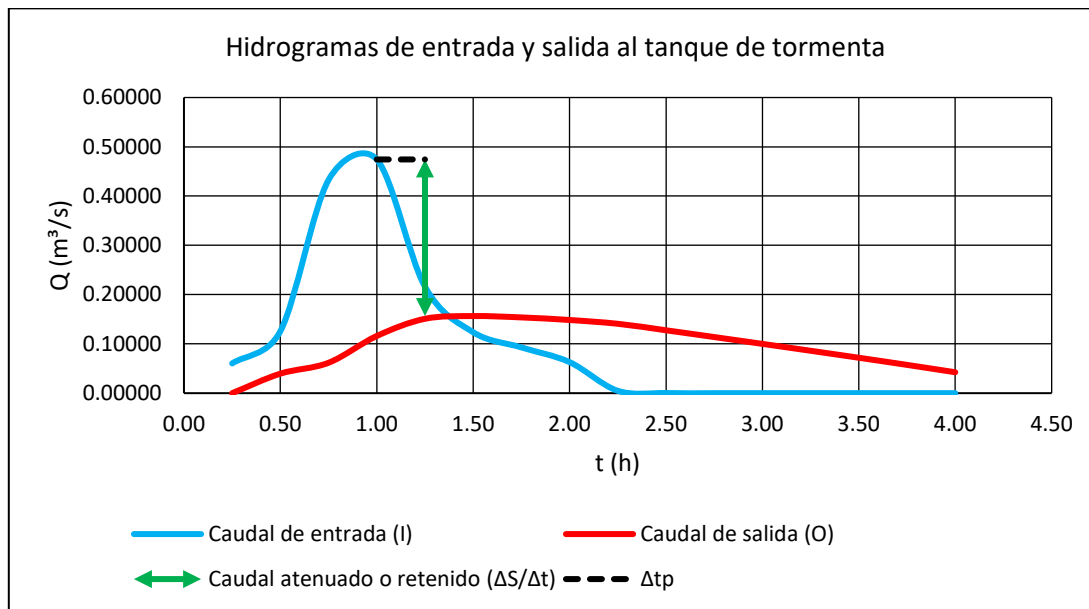
5.6.4.2 Tanque de Tormenta 2 (TT2)

El procedimiento de cálculo es igual que como se describió anteriormente.

Tabla 27 Cálculo de volúmenes de entrada y salida del tanque de tormenta 2.

1	2	3	4	5	6		
t	I	H (t)	O	f (H,t)	H (t+dt)	$V_i = I \times t$	$V_o = O \times t$
Tiempo	Caudal de entrada	Altura sobre la cresta	Caudal límite de salida	Cambio de H vs. t	Altura nueva sobre cresta	Volumen de entrada	Volumen de salida
(h)	(m³/s)	(m)	(m³/s)	(m/s)	(m)	(m³)	(m³)
0.25	0.06030	0.00	0.000	0.000151	0.14	54.27	0.00
0.50	0.12578	0.14	0.040	0.000215	0.33	226.40	71.30
0.75	0.43286	0.33	0.062	0.000928	1.16	1168.72	166.68
1.00	0.47434	1.16	0.116	0.000896	1.97	1707.62	417.79
1.25	0.21607	1.97	0.151	0.000163	2.12	972.32	679.35
1.50	0.12371	2.12	0.156	-0.000082	2.04	668.03	844.98
1.75	0.09284	2.04	0.154	-0.000152	1.91	584.89	968.49
2.00	0.06295	1.91	0.148	-0.000214	1.71	453.24	1069.10
2.25	0.00478	1.71	0.141	-0.000340	1.41	38.72	1140.41
2.50	0.00023	1.41	0.128	-0.000318	1.12	2.07	1148.45
2.75	0.00000	1.12	0.114	-0.000285	0.87	0.00	1127.42
3.00	0.00000	0.87	0.100	-0.000250	0.64	0.00	1080.30
3.25	0.00000	0.64	0.086	-0.000215	0.45	0.00	1006.66
3.50	0.00000	0.45	0.072	-0.000180	0.28	0.00	905.45
3.75	0.00000	0.28	0.057	-0.000143	0.16	0.00	774.82
4.00	0.00000	0.16	0.042	-0.000106	0.06	0.00	611.05

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 4 Hidrograma de entrada y salida del tanque de tormenta 2.

Fuente: Elaboración propia

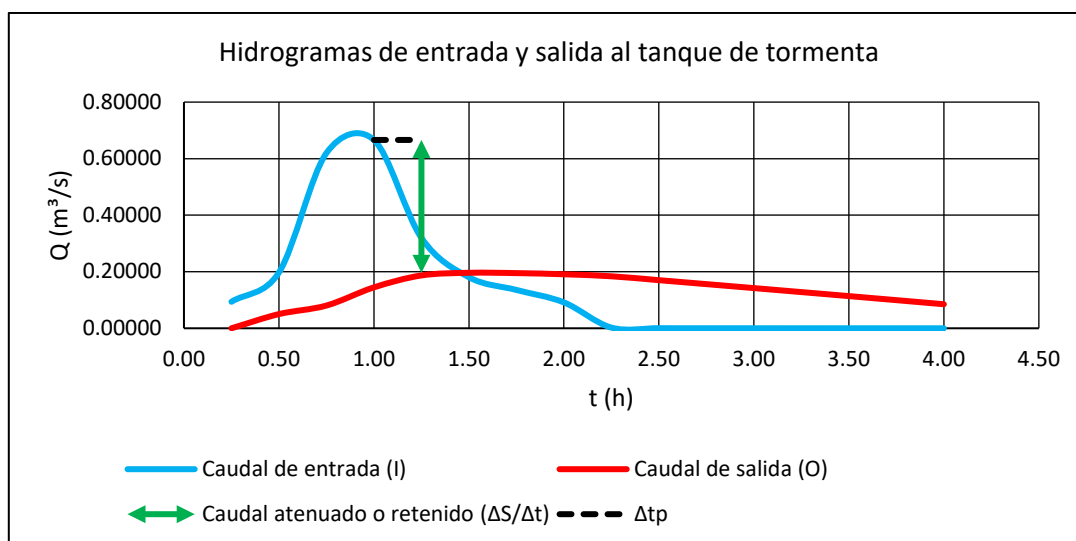
5.6.4.3 Tanque de Tormenta 3 (TT3)

A continuación, se presenta el cálculo de volúmenes e hidrograma de entrada y salida del tanque.

Tabla 28 Cálculo de volúmenes de entrada y salida del tanque de tormenta 3.

1	2	3	4	5	6		
t	I	H (t)	O	f (H,t)	H (t+dt)	$V_i = I \times t$	$V_o = O \times t$
Tiempo	Caudal de entrada	Altura sobre la cresta	Caudal límite de salida	Cambio de H vs. t	Altura nueva sobre cresta	Volumen de entrada	Volumen de salida
(h)	(m^3/s)	(m)	(m^3/s)	(m/s)	(m)	(m^3)	(m^3)
0.25	0.09382	0.00	0.000	0.000099	0.09	84.44	0.00
0.50	0.19735	0.09	0.050	0.000155	0.23	355.23	90.33
0.75	0.61987	0.23	0.080	0.000568	0.74	1673.65	217.16
1.00	0.66616	0.74	0.145	0.000549	1.23	2398.18	521.05
1.25	0.31967	1.23	0.187	0.000140	1.36	1438.52	841.21
1.50	0.18064	1.36	0.196	-0.000016	1.34	975.46	1059.67
1.75	0.13557	1.34	0.195	-0.000063	1.29	854.09	1229.54
2.00	0.09156	1.29	0.191	-0.000105	1.19	659.23	1375.37
2.25	0.00234	1.19	0.184	-0.000191	1.02	18.95	1489.61
2.50	0.00038	1.02	0.170	-0.000179	0.86	3.42	1531.23
2.75	0.00016	0.86	0.156	-0.000164	0.71	1.58	1546.10
3.00	0.00009	0.71	0.142	-0.000150	0.58	0.97	1535.04
3.25	0.00006	0.58	0.128	-0.000135	0.46	0.70	1497.83
3.50	0.00004	0.46	0.114	-0.000120	0.35	0.50	1434.09
3.75	0.00003	0.35	0.099	-0.000105	0.26	0.41	1343.25
4.00	0.00002	0.26	0.085	-0.000089	0.17	0.29	1224.44

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 5 Hidrograma de entrada y salida del tanque de tormenta 3.

Fuente: Elaboración propia

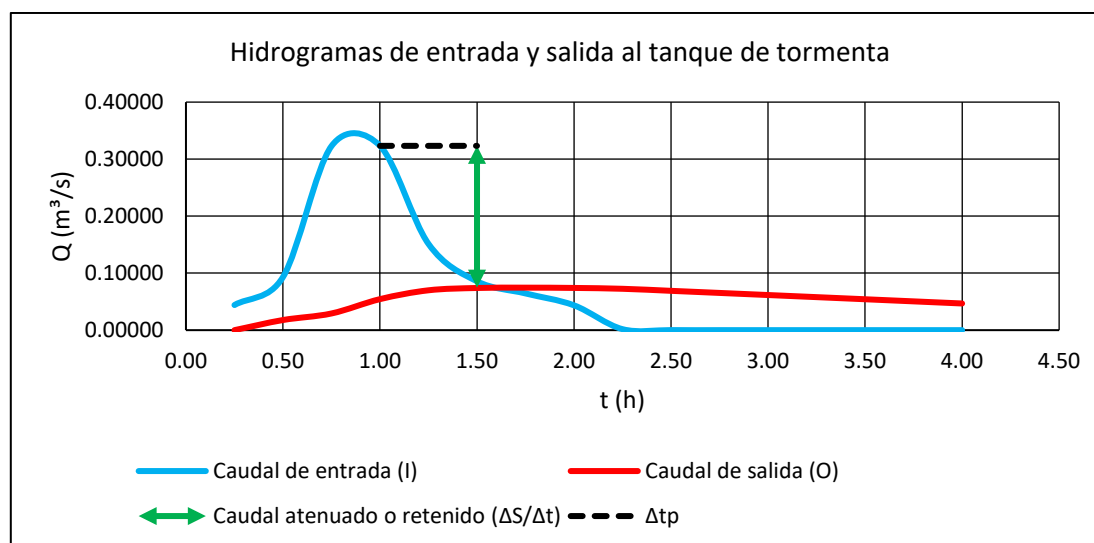
5.6.4.4 Tanque de Tormenta 4 (TT4)

A continuación, se presenta el cálculo de volúmenes e hidrograma de entrada y salida del tanque.

Tabla 29 Cálculo de volúmenes de entrada y salida del tanque de tormenta 4.

1	2	3	4	5	6		
t	I	H (t)	O	f (H,t)	H (t+dt)	$V_i = I \times t$	$V_o = O \times t$
Tiempo	Caudal de entrada	Altura sobre la cresta	Caudal límite de salida	Cambio de H vs. t	Altura nueva sobre cresta	Volumen de entrada	Volumen de salida
(h)	(m^3/s)	(m)	(m^3/s)	(m/s)	(m)	(m^3)	(m^3)
0.25	0.04404	0.00	0.000	0.000073	0.07	39.64	0.00
0.50	0.09313	0.07	0.018	0.000126	0.18	167.63	31.98
0.75	0.32281	0.18	0.029	0.000489	0.62	871.59	78.99
1.00	0.32327	0.62	0.054	0.000448	1.02	1163.77	195.87
1.25	0.15125	1.02	0.070	0.000136	1.14	680.63	314.60
1.50	0.08572	1.14	0.074	0.000020	1.16	462.89	399.40
1.75	0.06439	1.16	0.075	-0.000017	1.15	405.66	469.54
2.00	0.04351	1.15	0.074	-0.000051	1.10	313.27	533.10
2.25	0.00171	1.10	0.073	-0.000118	1.00	13.85	587.64
2.50	0.00011	1.00	0.069	-0.000115	0.89	0.99	620.64
2.75	0.00002	0.89	0.065	-0.000109	0.79	0.20	646.30
3.00	0.00000	0.79	0.062	-0.000103	0.70	0.00	665.24
3.25	0.00000	0.70	0.058	-0.000097	0.61	0.00	677.44
3.50	0.00000	0.61	0.054	-0.000090	0.53	0.00	682.90
3.75	0.00000	0.53	0.050	-0.000084	0.46	0.00	681.58
4.00	0.00000	0.46	0.047	-0.000078	0.39	0.00	673.44

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 6 Hidrograma de entrada y salida del tanque de tormenta 4.

Fuente: Elaboración propia

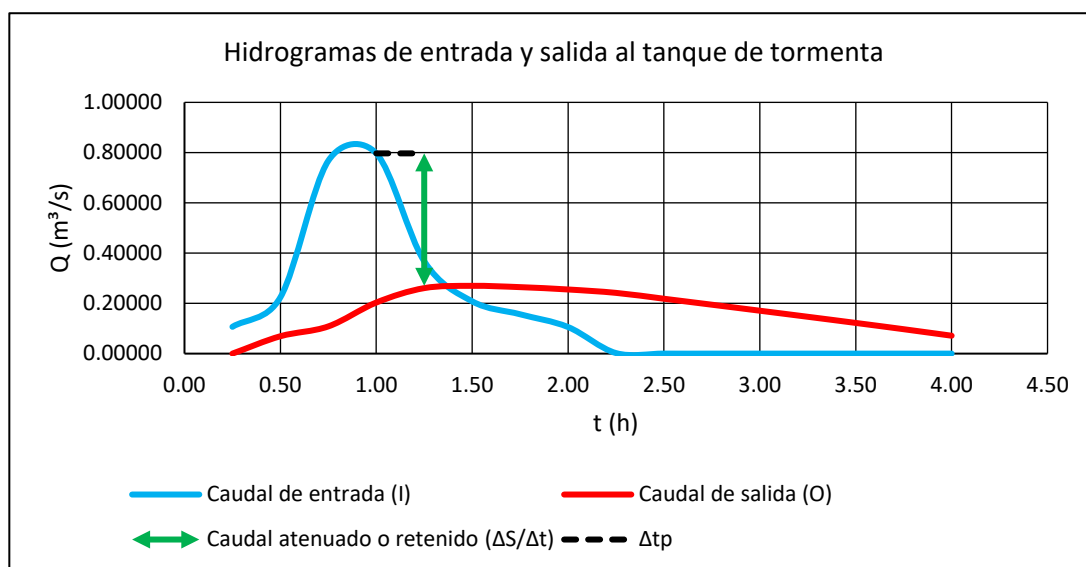
5.6.4.5 Tanque de Tormenta 5 (TT5)

A continuación, se presenta el cálculo de volúmenes e hidrograma de entrada y salida del tanque.

Tabla 30 Cálculo de volúmenes de entrada y salida del tanque de tormenta 5.

1	2	3	4	5	6		
t	I	H (t)	O	f (H,t)	H (t+dt)	$V_i = I \times t$	$V_o = O \times t$
Tiempo	Caudal de entrada	Altura sobre la cresta	Caudal límite de salida	Cambio de H vs. t	Altura nueva sobre cresta	Volumen de entrada	Volumen de salida
(h)	(m^3/s)	(m)	(m^3/s)	(m/s)	(m)	(m^3)	(m^3)
0.25	0.10664	0.00	0.000	0.000071	0.06	95.98	0.00
0.50	0.22408	0.06	0.069	0.000103	0.16	403.34	124.52
0.75	0.76769	0.16	0.108	0.000440	0.55	2072.76	292.51
1.00	0.79699	0.55	0.203	0.000396	0.91	2869.16	731.84
1.25	0.36767	0.91	0.261	0.000071	0.97	1654.52	1173.19
1.50	0.20811	0.97	0.270	-0.000041	0.94	1123.79	1456.70
1.75	0.15652	0.94	0.265	-0.000072	0.87	986.08	1666.86
2.00	0.10575	0.87	0.255	-0.000100	0.78	761.40	1837.82
2.25	0.00212	0.78	0.242	-0.000160	0.64	17.17	1958.20
2.50	0.00007	0.64	0.218	-0.000146	0.51	0.63	1965.44
2.75	0.00001	0.51	0.195	-0.000130	0.39	0.10	1927.16
3.00	0.00000	0.39	0.171	-0.000114	0.29	0.00	1844.19
3.25	0.00000	0.29	0.147	-0.000098	0.20	0.00	1715.37
3.50	0.00000	0.20	0.122	-0.000081	0.13	0.00	1538.84
3.75	0.00000	0.13	0.097	-0.000065	0.07	0.00	1311.31
4.00	0.00000	0.07	0.071	-0.000047	0.03	0.00	1025.94

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 7 Hidrograma de entrada y salida del tanque de tormenta 5.

Fuente: Elaboración propia

5.6.5 Ajuste de la Red Proyectada

Una vez incorporados los tanques de tormenta, se ajustó también la topología de la red, disminuyendo los diámetros considerablemente respecto a lo que se proponía con la optimización del sistema, esto debido a la atenuación de los caudales pico. A continuación, se presenta la red de alcantarillado pluvial ajustada.

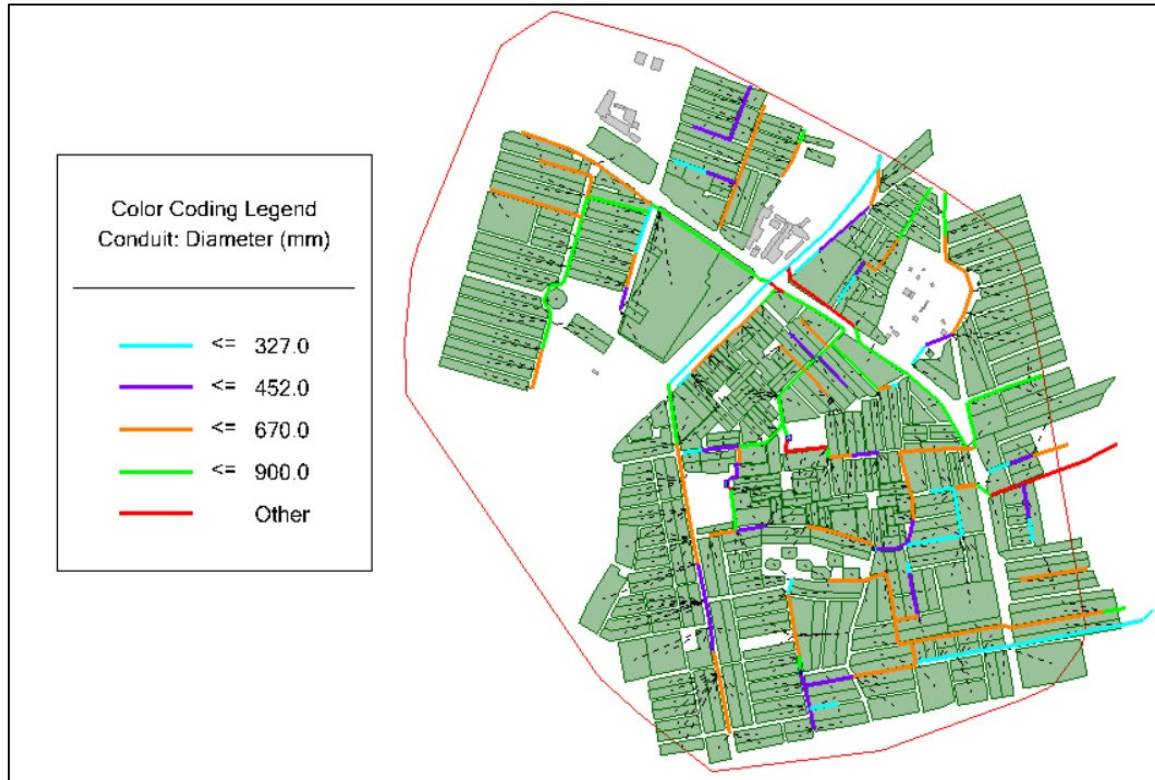


Ilustración 50 Red Ajustada con los tanques de tormenta.
Fuente: Elaboración propia

5.6.6 Análisis de Costos

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó un análisis comparativo de los costos de la red optimizada sin los tanques de tormenta y con la implementación de los tanques de tormenta.

5.6.6.1 Análisis Sin Tanques de Tormenta

Se calcularon unos costos de suministro de tubería, excavaciones, rellenos, entibados y pozos para cada caso.

Tabla 31 Costos de tuberías sin la implementación de tanques de tormenta.

Tramo	C _{tub}	C _{exc mecánica}	C _{exc manual}	C _{rell}	C _{ent}	C _{total}
	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]
CO-1	\$ 123,722,502	\$ 3,881,009	\$ -	\$ 246,884	\$ -	\$ 127,850,395
CO-2	\$ 123,118,978	\$ 3,833,200	\$ -	\$ 232,825	\$ -	\$ 127,185,003
CO-3	\$ 133,378,892	\$ 4,160,951	\$ -	\$ 253,984	\$ -	\$ 137,793,828
CO-6	\$ 397,119,055	\$ 12,259,825	\$ -	\$ 606,810	\$ -	\$ 409,985,691
CO-7	\$ 34,480,890	\$ 2,764,164	\$ -	\$ 362,803	\$ -	\$ 37,607,857
CO-8	\$ 19,886,489	\$ 1,333,421	\$ -	\$ 126,203	\$ -	\$ 21,346,113
CO-9	\$ 21,341,598	\$ 1,478,298	\$ -	\$ 156,057	\$ -	\$ 22,975,952
CO-10	\$ 35,928,274	\$ 2,404,789	\$ -	\$ 294,522	\$ -	\$ 38,627,585
CO-13	\$ 15,978,069	\$ 1,256,488	\$ -	\$ 157,273	\$ -	\$ 17,391,830
CO-14	\$ 154,502,246	\$ -	\$ 5,571,664	\$ 898,092	\$ 5,434,623	\$ 166,406,625
CO-15	\$ 153,898,722	\$ -	\$ 6,679,071	\$ 1,559,359	\$ 6,595,224	\$ 168,732,377
CO-16	\$ 107,125,581	\$ -	\$ 4,767,170	\$ 1,085,207	\$ 4,591,271	\$ 117,569,230
CO-18	\$ 32,270,328	\$ 2,505,154	\$ -	\$ 272,988	\$ -	\$ 35,048,470
CO-19	\$ 3,971,360	\$ 547,173	\$ -	\$ 114,041	\$ -	\$ 4,632,574
CO-20	\$ 30,657,695	\$ 3,024,281	\$ -	\$ 592,380	\$ -	\$ 34,274,355
CO-21	\$ 90,975,053	\$ 3,036,465	\$ -	\$ 244,546	\$ -	\$ 94,256,063
CO-22	\$ 20,437,874	\$ 1,771,499	\$ -	\$ 258,188	\$ -	\$ 22,467,561
CO-23	\$ 65,982,377	\$ 2,902,757	\$ -	\$ 329,244	\$ -	\$ 69,214,377
CO-24	\$ 17,565,056	\$ 1,522,447	\$ -	\$ 236,918	\$ -	\$ 19,324,422
CO-25	\$ 7,987,784	\$ 830,619	\$ -	\$ 144,462	\$ -	\$ 8,962,865
CO-26	\$ 2,762,685	\$ 340,149	\$ -	\$ 60,921	\$ -	\$ 3,163,755
CO-28	\$ 179,814,722	\$ 5,657,122	\$ -	\$ 395,028	\$ -	\$ 185,866,871
CO-29	\$ 77,305,790	\$ 2,381,316	\$ -	\$ 157,844	\$ -	\$ 79,844,950
CO-30	\$ 23,506,776	\$ 743,499	\$ -	\$ 60,095	\$ -	\$ 24,310,370
CO-31	\$ 77,854,648	\$ -	\$ 2,598,977	\$ 282,329	\$ 2,397,970	\$ 83,133,925
CO-32	\$ 32,892,080	\$ -	\$ 1,234,711	\$ 158,388	\$ 1,077,652	\$ 35,362,831
CO-33	\$ 120,704,880	\$ -	\$ 4,122,218	\$ 538,592	\$ 3,934,071	\$ 129,299,761
CO-34	\$ 76,647,599	\$ -	\$ 2,449,230	\$ 221,832	\$ 2,250,673	\$ 81,569,334

Tramo	C _{tub}	C _{exc mecánica}	C _{exc manual}	C _{rell}	C _{ent}	C _{total}
	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]
CO-35	\$ 29,622,506	\$ 2,889,211	\$ -	\$ 528,285	\$ -	\$ 33,040,002
CO-36	\$ 29,250,156	\$ 2,851,992	\$ -	\$ 521,072	\$ -	\$ 32,623,221
CO-37	\$ 19,405,078	\$ 2,275,299	\$ -	\$ 549,220	\$ -	\$ 22,229,597
CO-38	\$ 12,762,009	\$ 2,343,292	\$ -	\$ 679,238	\$ -	\$ 15,784,539
CO-39	\$ 29,214,980	\$ 3,722,784	\$ -	\$ 979,342	\$ -	\$ 33,917,106
CO-40	\$ 95,230,420	\$ 6,158,624	\$ -	\$ 1,170,319	\$ -	\$ 102,559,362
CO-41	\$ 7,227,382	\$ 1,047,450	\$ -	\$ 235,514	\$ -	\$ 8,510,346
CO-42	\$ 41,622,330	\$ 3,250,943	\$ -	\$ 397,332	\$ -	\$ 45,270,605
CO-43	\$ 15,545,255	\$ 1,667,187	\$ -	\$ 358,076	\$ -	\$ 17,570,517
CO-44	\$ 19,900,036	\$ 2,062,550	\$ -	\$ 409,451	\$ -	\$ 22,372,036
CO-45	\$ 5,741,058	\$ 1,072,824	\$ -	\$ 246,211	\$ -	\$ 7,060,093
CO-46	\$ 29,214,980	\$ 2,332,338	\$ -	\$ 303,011	\$ -	\$ 31,850,329
CO-47	\$ 24,161,374	\$ 1,862,132	\$ -	\$ 199,327	\$ -	\$ 26,222,833
CO-48	\$ 23,954,513	\$ 1,961,241	\$ -	\$ 249,899	\$ -	\$ 26,165,653
CO-49	\$ 35,996,970	\$ 2,481,556	\$ -	\$ 328,534	\$ -	\$ 38,807,060
CO-50	\$ 52,542,714	\$ 4,904,763	\$ -	\$ 838,972	\$ -	\$ 58,286,449
CO-51	\$ 129,020,307	\$ 5,467,872	\$ -	\$ 536,658	\$ -	\$ 135,024,837
CO-52	\$ 200,522,905	\$ 6,666,153	\$ -	\$ 556,309	\$ -	\$ 207,745,368
CO-53	\$ 178,039,698	\$ 5,608,277	\$ -	\$ 353,961	\$ -	\$ 184,001,937
CO-54	\$ 229,339,272	\$ 7,323,839	\$ -	\$ 491,171	\$ -	\$ 237,154,282
CO-55	\$ 3,434,306	\$ 750,985	\$ -	\$ 194,263	\$ -	\$ 4,379,554
CO-56	\$ 18,719,228	\$ 1,561,034	\$ -	\$ 224,517	\$ -	\$ 20,504,779
CO-58	\$ 13,958,268	\$ 1,089,221	\$ -	\$ 133,700	\$ -	\$ 15,181,189
CO-59	\$ 15,905,934	\$ 1,358,965	\$ -	\$ 205,296	\$ -	\$ 17,470,195
CO-60	\$ 31,796,825	\$ 2,317,315	\$ -	\$ 283,154	\$ -	\$ 34,397,294
CO-61	\$ 11,425,300	\$ 900,368	\$ -	\$ 131,996	\$ -	\$ 12,457,663
CO-62	\$ 13,311,552	\$ 1,167,484	\$ -	\$ 207,632	\$ -	\$ 14,686,667
CO-63	\$ 53,263,616	\$ 2,197,001	\$ -	\$ 244,800	\$ -	\$ 55,705,417
CO-64	\$ 70,157,505	\$ 2,324,331	\$ -	\$ 201,103	\$ -	\$ 72,682,939

Tramo	C _{tub}	C _{exc mecánica}	C _{exc manual}	C _{rell}	C _{ent}	C _{total}
	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]
CO-65	\$ 105,315,008	\$ -	\$ 3,183,735	\$ 239,777	\$ 2,983,870	\$ 111,722,390
CO-67	\$ 20,234,079	\$ 1,655,997	\$ -	\$ 228,472	\$ -	\$ 22,118,548
CO-69	\$ 15,950,771	\$ 1,499,327	\$ -	\$ 272,833	\$ -	\$ 17,722,931
CO-70	\$ 19,610,430	\$ 1,616,388	\$ -	\$ 209,589	\$ -	\$ 21,436,408
CO-71	\$ 5,626,621	\$ 487,957	\$ -	\$ 70,271	\$ -	\$ 6,184,849
CO-72	\$ 11,747,103	\$ 741,751	\$ -	\$ 77,599	\$ -	\$ 12,566,453
CO-73	\$ 42,292,964	\$ 1,753,849	\$ -	\$ 164,477	\$ -	\$ 44,211,290
CO-74	\$ 15,525,265	\$ 651,021	\$ -	\$ 65,070	\$ -	\$ 16,241,356
CO-75	\$ 20,477,289	\$ 872,324	\$ -	\$ 91,217	\$ -	\$ 21,440,830
CO-76	\$ 43,326,238	\$ 1,776,466	\$ -	\$ 165,351	\$ -	\$ 45,268,055
CO-77	\$ 65,525,193	\$ 2,769,049	\$ -	\$ 284,097	\$ -	\$ 68,578,339
CO-78	\$ 41,335,986	\$ 1,760,798	\$ -	\$ 187,398	\$ -	\$ 43,284,182
CO-79	\$ 75,816,679	\$ 3,181,425	\$ -	\$ 371,619	\$ -	\$ 79,369,723
CO-80	\$ 39,347,897	\$ 1,655,772	\$ -	\$ 196,376	\$ -	\$ 41,200,044
CO-81	\$ 26,231,931	\$ 1,107,572	\$ -	\$ 132,943	\$ -	\$ 27,472,446
CO-82	\$ 52,943,715	\$ 2,305,524	\$ -	\$ 299,261	\$ -	\$ 55,548,500
CO-83	\$ 39,667,798	\$ 1,742,238	\$ -	\$ 231,093	\$ -	\$ 41,641,129
CO-84	\$ 81,398,732	\$ 2,816,387	\$ -	\$ 265,186	\$ -	\$ 84,480,306
CO-85	\$ 1,640,344	\$ 221,065	\$ -	\$ 43,628	\$ -	\$ 1,905,037
CO-87	\$ 6,055,708	\$ 843,201	\$ -	\$ 180,373	\$ -	\$ 7,079,281
CO-87A	\$ 25,599,138	\$ 1,828,539	\$ -	\$ 211,467	\$ -	\$ 27,639,144
CO-88	\$ 20,955,436	\$ 1,659,109	\$ -	\$ 211,172	\$ -	\$ 22,825,718
CO-88A	\$ 57,118,246	\$ 2,817,739	\$ -	\$ 277,716	\$ -	\$ 60,213,700
CO-89	\$ 310,815,066	\$ 10,001,452	\$ -	\$ 683,444	\$ -	\$ 321,499,961
CO-89A	\$ 20,479,247	\$ 1,624,253	\$ -	\$ 190,024	\$ -	\$ 22,293,524
CO-90	\$ 87,013,235	\$ 3,582,674	\$ -	\$ 393,512	\$ -	\$ 90,989,421
CO-90A	\$ 27,539,284	\$ 1,861,645	\$ -	\$ 179,772	\$ -	\$ 29,580,700
CO-91	\$ 21,880,527	\$ 1,602,801	\$ -	\$ 199,011	\$ -	\$ 23,682,339
CO-92	\$ 60,762,676	\$ 2,441,309	\$ -	\$ 198,148	\$ -	\$ 63,402,132

Tramo	C _{tub}	C _{exc mecánica}	C _{exc manual}	C _{rell}	C _{ent}	C _{total}
	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]
CO-93	\$ 81,906,492	\$ 3,138,803	\$ -	\$ 206,084	\$ -	\$ 85,251,379
CO-94	\$ 62,769,461	\$ 2,500,947	\$ -	\$ 203,748	\$ -	\$ 65,474,155
CO-95	\$ 27,952,605	\$ 2,161,636	\$ -	\$ 257,785	\$ -	\$ 30,372,026
CO-96	\$ 26,185,279	\$ 2,021,661	\$ -	\$ 240,123	\$ -	\$ 28,447,063
CO-97	\$ 17,024,038	\$ 1,829,935	\$ -	\$ 395,240	\$ -	\$ 19,249,213
CO-98	\$ 9,312,587	\$ 972,102	\$ -	\$ 170,677	\$ -	\$ 10,455,367
CO-99	\$ 16,338,748	\$ 1,246,663	\$ -	\$ 143,826	\$ -	\$ 17,729,237
CO-100	\$ 10,279,345	\$ 796,028	\$ -	\$ 95,884	\$ -	\$ 11,171,256
CO-106	\$ 6,119,778	\$ 1,060,776	\$ -	\$ 224,677	\$ -	\$ 7,405,231
CO-107	\$ 16,763,549	\$ 1,521,461	\$ -	\$ 261,884	\$ -	\$ 18,546,894
CO-108	\$ 7,361,537	\$ 803,506	\$ -	\$ 128,156	\$ -	\$ 8,293,198
CO-109	\$ 5,189,280	\$ 635,126	\$ -	\$ 119,996	\$ -	\$ 5,944,403
CO-110	\$ 15,833,798	\$ 1,298,727	\$ -	\$ 179,877	\$ -	\$ 17,312,402
CO-111	\$ 14,030,404	\$ 1,147,335	\$ -	\$ 157,727	\$ -	\$ 15,335,466
CO-112	\$ 13,200,843	\$ 1,001,882	\$ -	\$ 114,075	\$ -	\$ 14,316,799
CO-113	\$ 22,796,706	\$ 1,749,662	\$ -	\$ 243,643	\$ -	\$ 24,790,012
CO-114	\$ 30,776,035	\$ 2,202,051	\$ -	\$ 318,186	\$ -	\$ 33,296,272
CO-115	\$ 34,905,944	\$ 1,390,891	\$ -	\$ 116,510	\$ -	\$ 36,413,345
CO-116	\$ 17,114,736	\$ 678,523	\$ -	\$ 68,033	\$ -	\$ 17,861,292
CO-117	\$ 41,747,159	\$ 1,711,518	\$ -	\$ 187,860	\$ -	\$ 43,646,537
CO-118	\$ 14,235,621	\$ 571,306	\$ -	\$ 59,689	\$ -	\$ 14,866,617
CO-119	\$ 56,942,485	\$ 2,332,960	\$ -	\$ 254,217	\$ -	\$ 59,529,662
CO-120	\$ 113,666,771	\$ 3,944,274	\$ -	\$ 371,165	\$ -	\$ 117,982,211
CO-121	\$ 47,982,904	\$ 1,480,632	\$ -	\$ 102,604	\$ -	\$ 49,566,141
CO-122	\$ 136,920,914	\$ 4,278,398	\$ -	\$ 293,772	\$ -	\$ 141,493,084
CO-123	\$ 3,244,946	\$ 588,318	\$ -	\$ 128,206	\$ -	\$ 3,961,469
CO-124	\$ 10,972,505	\$ 980,820	\$ -	\$ 163,182	\$ -	\$ 12,116,507
CO-125	\$ 8,534,170	\$ 1,022,794	\$ -	\$ 244,612	\$ -	\$ 9,801,576
CO-126	\$ 10,964,635	\$ 828,312	\$ -	\$ 93,238	\$ -	\$ 11,886,184

Tramo	C _{tub}	C _{exc mecánica}	C _{exc manual}	C _{rell}	C _{ent}	C _{total}
	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]
CO-127	\$ 9,557,987	\$ 719,574	\$ -	\$ 80,315	\$ -	\$ 10,357,876
CO-128	\$ 18,502,821	\$ 1,561,515	\$ -	\$ 230,367	\$ -	\$ 20,294,703
CO-129	\$ 23,700,295	\$ 1,465,718	\$ -	\$ 140,982	\$ -	\$ 25,306,995
CO-130	\$ 29,264,712	\$ 1,819,410	\$ -	\$ 177,295	\$ -	\$ 31,261,417
CO-132	\$ 6,429,192	\$ 664,929	\$ -	\$ 114,107	\$ -	\$ 7,208,227
CO-133	\$ 3,749,359	\$ 465,169	\$ -	\$ 84,896	\$ -	\$ 4,299,423
CO-134	\$ 3,167,480	\$ 503,198	\$ -	\$ 93,604	\$ -	\$ 3,764,282
CO-135	\$ 35,241,308	\$ 2,130,850	\$ -	\$ 185,398	\$ -	\$ 37,557,556
CO-137	\$ 122,410,369	\$ 4,709,528	\$ -	\$ 617,812	\$ -	\$ 127,737,708
CO-138	\$ 85,770,531	\$ 2,785,959	\$ -	\$ 196,858	\$ -	\$ 88,753,347
CO-139	\$ 72,863,315	\$ 2,357,082	\$ -	\$ 164,886	\$ -	\$ 75,385,283
CO-140	\$ 66,409,707	\$ 2,143,337	\$ -	\$ 149,078	\$ -	\$ 68,702,122
CO-146	\$ 23,985,138	\$ 2,277,062	\$ -	\$ 418,165	\$ -	\$ 26,680,366
CO-147	\$ 32,022,095	\$ 2,942,025	\$ -	\$ 484,850	\$ -	\$ 35,448,970
CO-148	\$ 4,260,605	\$ 711,029	\$ -	\$ 142,218	\$ -	\$ 5,113,852
CO-149	\$ 9,565,858	\$ 999,210	\$ -	\$ 175,728	\$ -	\$ 10,740,796
CO-150	\$ 27,772,265	\$ 2,147,343	\$ -	\$ 255,979	\$ -	\$ 30,175,587
CO-151	\$ 4,097,067	\$ 703,079	\$ -	\$ 145,274	\$ -	\$ 4,945,420
CO-152	\$ 10,896,307	\$ 1,091,439	\$ -	\$ 215,421	\$ -	\$ 12,203,168
CO-153	\$ 7,467,399	\$ -	\$ 1,502,617	\$ 507,657	\$ 2,926,388	\$ 12,404,062
CO-154	\$ 159,632,204	\$ 5,014,738	\$ -	\$ 314,376	\$ -	\$ 164,961,318
CO-154A	\$ 112,557,301	\$ -	\$ 4,916,909	\$ 1,096,787	\$ 4,746,743	\$ 123,317,740
CO-155	\$ 18,741,614	\$ 1,435,285	\$ -	\$ 151,247	\$ -	\$ 20,328,145
CO-155A	\$ 181,359,082	\$ -	\$ 6,960,684	\$ 1,339,548	\$ 6,898,976	\$ 196,558,290
CO-156	\$ 76,647,599	\$ 2,358,247	\$ -	\$ 139,110	\$ -	\$ 79,144,956
CO-156A	\$ 35,306,177	\$ -	\$ 1,272,158	\$ 147,465	\$ 1,113,080	\$ 37,838,880
CO-157	\$ 17,376,330	\$ 1,372,505	\$ -	\$ 158,952	\$ -	\$ 18,907,788
CO-158	\$ 44,114,092	\$ 2,162,212	\$ -	\$ 209,737	\$ -	\$ 46,486,041
CO-159	\$ 46,914,986	\$ 2,645,195	\$ -	\$ 382,307	\$ -	\$ 49,942,488

Tramo	C _{tub}	C _{exc mecánica}	C _{exc manual}	C _{rell}	C _{ent}	C _{total}
	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]
CO-160	\$ 179,246,747	\$ 5,633,339	\$ -	\$ 350,186	\$ -	\$ 185,230,273
CO-161	\$ 89,665,023	\$ 2,879,107	\$ -	\$ 233,239	\$ -	\$ 92,777,368
CO-162	\$ 149,280,146	\$ 4,944,920	\$ -	\$ 447,972	\$ -	\$ 154,673,039
CO-163	\$ 95,138,671	\$ 3,152,076	\$ -	\$ 244,549	\$ -	\$ 98,535,296
CO-163A	\$ 103,882,269	\$ 3,940,931	\$ -	\$ 498,128	\$ -	\$ 108,321,329
CO-164	\$ 38,434,788	\$ 3,534,804	\$ -	\$ 585,170	\$ -	\$ 42,554,762
CO-164A	\$ 64,461,881	\$ -	\$ 2,473,276	\$ 401,092	\$ 2,548,919	\$ 69,885,169
CO-165	\$ 112,859,063	\$ -	\$ 3,978,207	\$ 562,939	\$ 3,785,909	\$ 121,186,118
CO-166	\$ 48,815,593	\$ 2,636,167	\$ -	\$ 343,403	\$ -	\$ 51,795,163
CO-167	\$ 92,037,471	\$ -	\$ 3,387,103	\$ 514,877	\$ 3,184,558	\$ 99,124,008
CO-168	\$ 160,537,490	\$ -	\$ 6,273,887	\$ 1,223,701	\$ 6,170,241	\$ 174,205,320
CO-169	\$ 209,724,729	\$ -	\$ 9,428,960	\$ 2,451,796	\$ 9,548,291	\$ 231,153,776
CO-170	\$ 143,337,045	\$ -	\$ 6,998,553	\$ 1,905,612	\$ 6,930,461	\$ 159,171,670
CO-171	\$ 41,341,421	\$ -	\$ 2,172,897	\$ 526,804	\$ 1,973,465	\$ 46,014,588
CO-172	\$ 207,310,631	\$ -	\$ 10,179,919	\$ 2,968,001	\$ 10,362,713	\$ 230,821,263
CO-173	\$ 172,909,741	\$ -	\$ 8,192,544	\$ 2,215,012	\$ 8,208,676	\$ 191,525,973
CO-174	\$ 197,956,003	\$ -	\$ 7,691,817	\$ 1,544,513	\$ 7,679,326	\$ 214,871,660
CO-175	\$ 136,094,752	\$ -	\$ 4,132,075	\$ 345,750	\$ 3,947,519	\$ 144,520,096
CO-176	\$ 20,744,966	\$ 891,803	\$ -	\$ 95,878	\$ -	\$ 21,732,648
CO-177	\$ 133,982,417	\$ 4,273,198	\$ -	\$ 297,336	\$ -	\$ 138,552,951
CO-178	\$ 139,715,899	\$ -	\$ 4,388,984	\$ 436,079	\$ 4,210,521	\$ 148,751,483
CO-179	\$ 97,770,953	\$ -	\$ 3,123,984	\$ 302,733	\$ 2,922,572	\$ 104,120,242
CO-180	\$ 52,808,385	\$ 1,637,551	\$ -	\$ 104,687	\$ -	\$ 54,550,623
CO-181	\$ 10,026,870	\$ 833,339	\$ -	\$ 118,380	\$ -	\$ 10,978,589
CO-182	\$ 26,654,245	\$ 1,647,377	\$ -	\$ 157,573	\$ -	\$ 28,459,196
CO-186	\$ 11,066,003	\$ 1,199,970	\$ -	\$ 224,121	\$ -	\$ 12,490,094
CO-187	\$ 19,486,313	\$ 1,637,086	\$ -	\$ 222,323	\$ -	\$ 21,345,722
CO-188	\$ 21,006,710	\$ 990,721	\$ -	\$ 85,085	\$ -	\$ 22,082,516
CO-189	\$ 66,517,731	\$ 2,764,151	\$ -	\$ 257,337	\$ -	\$ 69,539,219

Tramo	C _{tub}	C _{exc mecánica}	C _{exc manual}	C _{rell}	C _{ent}	C _{total}
	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]
CO-190	\$ 56,951,804	\$ 2,317,490	\$ -	\$ 207,397	\$ -	\$ 59,476,690
CO-191	\$ 91,704,651	\$ 3,930,041	\$ -	\$ 419,656	\$ -	\$ 96,054,349
CO-192	\$ 41,636,180	\$ 1,385,876	\$ -	\$ 114,569	\$ -	\$ 43,136,624
CO-193	\$ 49,130,692	\$ 1,884,153	\$ -	\$ 245,800	\$ -	\$ 51,260,646
CO-194	\$ 34,558,029	\$ -	\$ 1,410,729	\$ 213,875	\$ 1,472,708	\$ 37,655,342
CO-195	\$ 12,074,492	\$ -	\$ 516,052	\$ 70,076	\$ 500,144	\$ 13,160,764
CO-196	\$ 90,142,330	\$ -	\$ 3,707,220	\$ 689,237	\$ 4,154,971	\$ 98,693,758
CO-197	\$ 70,156,963	\$ -	\$ 2,922,998	\$ 531,252	\$ 3,218,955	\$ 76,830,168
CO-198	\$ 18,407,494	\$ 547,860	\$ -	\$ 30,060	\$ -	\$ 18,985,414
CO-199	\$ 45,867,854	\$ -	\$ 1,540,998	\$ 149,703	\$ 1,368,120	\$ 48,926,675

*Costos proyectados en pesos colombianos al año 2023

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32 Costos de Pozos sin la implementación de tanques de tormenta.

Cámara	Condición	Diámetro	Cota Rasante	Cota de Fondo	C _{cam}
		[mm]	[m.s.n.m.]	[m.s.n.m.]	[\$COP]
MH-1	Proyectado	1,200.00	282.89	280.95	\$ 2,256,673
MH-2	Proyectado	1,200.00	282.40	280.49	\$ 2,246,095
MH-3	Proyectado	1,200.00	282.10	280.19	\$ 2,246,095
MH-4	Proyectado	1,200.00	282.03	280.12	\$ 2,246,095
MH-5	Proyectado	1,200.00	280.88	279.88	\$ 2,082,328
MH-6	Proyectado	1,200.00	278.90	277.75	\$ 2,088,387
MH-7	Proyectado	1,200.00	278.50	277.35	\$ 2,088,387
MH-8	Proyectado	1,200.00	278.20	276.98	\$ 2,094,043
MH-9	Proyectado	1,200.00	282.60	281.61	\$ 2,082,218
MH-10	Proyectado	1,200.00	282.50	280.59	\$ 2,246,095
MH-11	Proyectado	1,200.00	283.50	280.54	\$ 2,812,997
MH-12	Proyectado	1,200.00	283.50	280.49	\$ 2,850,092
MH-13	Proyectado	1,200.00	283.49	280.46	\$ 2,865,188
MH-14	Proyectado	1,200.00	283.34	282.27	\$ 2,084,127
MH-15	Proyectado	1,200.00	283.25	282.52	\$ 2,092,247
MH-16	Proyectado	1,200.00	282.67	281.68	\$ 2,082,218
MH-17	Proyectado	1,200.00	282.50	280.90	\$ 2,156,149
MH-18	Proyectado	1,200.00	282.98	281.91	\$ 2,084,127
MH-19	Proyectado	1,200.00	282.51	281.13	\$ 2,113,728
MH-20	Proyectado	1,200.00	282.60	281.60	\$ 2,082,328

Cámara	Condición	Diámetro	Cota Rasante	Cota de Fondo	C _{cam}
		[mm]	[m.s.n.m.]	[m.s.n.m.]	[\$COP]
MH-21	Proyectado	1,200.00	282.50	281.20	\$ 2,102,710
MH-22	Proyectado	1,200.00	282.79	281.98	\$ 2,086,516
MH-23	Proyectado	1,200.00	283.01	282.28	\$ 2,092,247
MH-24	Proyectado	1,200.00	282.30	280.61	\$ 2,178,626
MH-25	Proyectado	1,200.00	281.96	280.27	\$ 2,178,626
MH-26	Proyectado	1,200.00	281.61	279.92	\$ 2,178,626
MH-27	Proyectado	1,200.00	281.60	279.69	\$ 2,246,095
MH-28	Proyectado	1,200.00	282.10	279.67	\$ 2,476,234
MH-29	Proyectado	1,200.00	282.00	279.66	\$ 2,429,295
MH-30	Proyectado	1,200.00	281.80	279.62	\$ 2,353,194
MH-31	Proyectado	1,200.00	281.75	280.68	\$ 2,084,127
MH-32	Proyectado	1,200.00	282.20	281.13	\$ 2,084,127
MH-33	Proyectado	1,200.00	281.75	280.90	\$ 2,084,533
MH-34	Proyectado	1,200.00	281.96	281.20	\$ 2,089,822
MH-35	Proyectado	1,200.00	281.80	280.81	\$ 2,082,218
MH-36	Proyectado	1,200.00	282.20	280.90	\$ 2,102,710
MH-37	Proyectado	1,200.00	282.50	281.43	\$ 2,084,127
MH-38	Proyectado	1,200.00	283.12	282.40	\$ 2,093,128
MH-39	Proyectado	1,200.00	282.73	281.74	\$ 2,082,218
MH-40	Proyectado	1,200.00	282.18	281.19	\$ 2,082,218
MH-43	Proyectado	1,200.00	280.11	279.11	\$ 2,082,328
MH-44	Proyectado	1,200.00	279.08	278.01	\$ 2,084,127
MH-45	Proyectado	1,200.00	278.68	277.61	\$ 2,084,127
MH-46	Proyectado	1,200.00	278.04	276.82	\$ 2,094,043
MH-48	Proyectado	1,200.00	283.65	282.43	\$ 2,094,043
MH-49	Proyectado	1,200.00	283.54	282.17	\$ 2,112,223
MH-50	Proyectado	1,200.00	283.26	281.51	\$ 2,195,264
MH-51	Proyectado	1,200.00	283.08	281.16	\$ 2,249,584
MH-52	Proyectado	1,200.00	282.54	280.63	\$ 2,246,095
MH-53	Proyectado	1,200.00	282.00	280.09	\$ 2,246,095
MH-54	Proyectado	1,200.00	282.00	280.97	\$ 2,082,879
MH-55	Proyectado	1,200.00	281.09	279.19	\$ 2,242,643
MH-56	Proyectado	1,200.00	283.25	282.26	\$ 2,082,218
MH-57	Proyectado	1,200.00	283.25	282.20	\$ 2,083,429
MH-58	Proyectado	1,200.00	283.18	281.97	\$ 2,093,125
MH-59	Proyectado	1,200.00	283.00	281.72	\$ 2,100,323
MH-60	Proyectado	1,200.00	283.00	281.50	\$ 2,134,663
MH-61	Proyectado	1,200.00	282.77	281.16	\$ 2,158,499
MH-62	Proyectado	1,200.00	282.77	281.01	\$ 2,198,165
MH-63	Proyectado	1,200.00	282.98	280.99	\$ 2,275,037
MH-64	Proyectado	1,200.00	283.01	282.01	\$ 2,082,328

Cámara	Condición	Diámetro	Cota Rasante	Cota de Fondo	C _{cam}
		[mm]	[m.s.n.m.]	[m.s.n.m.]	[\$COP]
MH-65	Proyectado	1,200.00	282.60	281.45	\$ 2,088,387
MH-66	Proyectado	1,200.00	282.95	282.10	\$ 2,084,533
MH-67	Proyectado	1,200.00	283.19	282.12	\$ 2,084,127
MH-68	Proyectado	1,200.00	283.23	281.91	\$ 2,105,244
MH-69	Proyectado	1,200.00	283.00	281.78	\$ 2,094,043
MH-70	Proyectado	1,200.00	283.17	281.74	\$ 2,121,808
MH-71	Proyectado	1,200.00	283.25	281.71	\$ 2,142,816
MH-72	Proyectado	1,200.00	281.86	280.41	\$ 2,125,297
MH-73	Proyectado	1,200.00	282.50	280.55	\$ 2,260,272
MH-74	Proyectado	1,200.00	283.46	281.89	\$ 2,149,317
MH-75	Proyectado	1,200.00	283.25	281.67	\$ 2,151,558
MH-76	Proyectado	1,200.00	283.25	281.64	\$ 2,158,499
MH-77	Proyectado	1,200.00	283.25	281.60	\$ 2,168,269
MH-78	Proyectado	1,200.00	283.25	281.57	\$ 2,175,982
MH-79	Proyectado	1,200.00	283.24	281.52	\$ 2,186,779
MH-80	Proyectado	1,200.00	283.25	281.50	\$ 2,195,264
MH-81	Proyectado	1,200.00	283.25	281.48	\$ 2,201,103
MH-82	Proyectado	1,200.00	283.25	281.45	\$ 2,210,138
MH-83	Proyectado	1,200.00	283.25	281.43	\$ 2,216,345
MH-84	Proyectado	1,200.00	282.40	281.67	\$ 2,092,247
MH-85	Proyectado	1,200.00	281.80	280.65	\$ 2,088,387
MH-86	Proyectado	1,200.00	283.12	281.21	\$ 2,246,095
MH-87	Proyectado	1,200.00	283.25	282.18	\$ 2,084,127
MH-88	Proyectado	1,200.00	282.45	281.72	\$ 2,092,247
MH-89	Proyectado	1,200.00	281.87	280.87	\$ 2,082,328
MH-90	Proyectado	1,200.00	281.80	280.73	\$ 2,084,127
MH-91	Proyectado	1,200.00	281.53	280.38	\$ 2,088,387
MH-92	Proyectado	1,200.00	280.93	279.78	\$ 2,088,387
MH-93	Proyectado	1,200.00	280.18	278.81	\$ 2,112,223
MH-94	Proyectado	1,200.00	280.05	278.59	\$ 2,127,097
MH-95	Proyectado	1,200.00	279.64	278.19	\$ 2,125,297
MH-98	Proyectado	1,200.00	283.65	282.65	\$ 2,082,328
MH-99	Proyectado	1,200.00	283.24	282.24	\$ 2,082,328
MH-100	Proyectado	1,200.00	282.72	281.73	\$ 2,082,218
MH-101	Proyectado	1,200.00	282.61	280.70	\$ 2,246,095
MH-102	Proyectado	1,200.00	283.00	282.19	\$ 2,086,516
MH-103	Proyectado	1,200.00	282.75	281.76	\$ 2,082,218
MH-104	Proyectado	1,200.00	282.49	281.49	\$ 2,082,328
MH-111	Proyectado	1,200.00	279.55	278.48	\$ 2,084,127
MH-112	Proyectado	1,200.00	280.10	279.42	\$ 2,097,022
MH-113	Proyectado	1,200.00	279.88	279.03	\$ 2,084,533

Cámara	Condición	Diámetro	Cota Rasante	Cota de Fondo	C _{cam}
		[mm]	[m.s.n.m.]	[m.s.n.m.]	[\$COP]
MH-114	Proyectado	1,200.00	279.14	278.38	\$ 2,089,822
MH-115	Proyectado	1,200.00	279.00	278.24	\$ 2,089,822
MH-116	Proyectado	1,200.00	278.50	277.51	\$ 2,082,218
MH-117	Proyectado	1,200.00	278.60	277.44	\$ 2,089,085
MH-118	Proyectado	1,200.00	278.25	277.26	\$ 2,082,218
MH-121	Proyectado	1,200.00	281.75	280.45	\$ 2,102,710
MH-122	Proyectado	1,200.00	281.45	280.15	\$ 2,102,710
MH-123	Proyectado	1,200.00	282.81	280.90	\$ 2,246,095
MH-124	Proyectado	1,200.00	282.80	281.30	\$ 2,134,663
MH-125	Proyectado	1,200.00	282.57	281.12	\$ 2,125,297
MH-126	Proyectado	1,200.00	282.75	281.10	\$ 2,168,269
MH-127	Proyectado	1,200.00	282.76	281.09	\$ 2,173,374
MH-128	Proyectado	1,200.00	282.75	281.06	\$ 2,178,626
MH-129	Proyectado	1,200.00	282.75	281.05	\$ 2,181,307
MH-130	Proyectado	1,200.00	282.65	281.02	\$ 2,163,310
MH-131	Proyectado	1,200.00	282.67	280.93	\$ 2,192,399
MH-132	Proyectado	1,200.00	282.46	280.76	\$ 2,181,307
MH-133	Proyectado	1,200.00	282.75	280.96	\$ 2,207,090
MH-134	Proyectado	1,200.00	282.55	280.85	\$ 2,181,307
MH-136	Proyectado	1,200.00	282.66	281.89	\$ 2,089,088
MH-137	Proyectado	1,200.00	282.66	281.78	\$ 2,083,431
MH-138	Proyectado	1,200.00	282.73	281.69	\$ 2,083,136
MH-139	Proyectado	1,200.00	279.10	277.49	\$ 2,158,499
MH-141	Proyectado	1,200.00	280.39	279.39	\$ 2,082,328
MH-142	Proyectado	1,200.00	280.32	279.33	\$ 2,082,218
MH-143	Proyectado	1,200.00	280.07	279.08	\$ 2,082,218
MH-144	Proyectado	1,200.00	279.48	278.25	\$ 2,094,998
MH-145	Proyectado	1,200.00	279.53	278.22	\$ 2,103,959
MH-146	Proyectado	1,200.00	279.30	278.08	\$ 2,094,043
MH-147	Proyectado	1,200.00	280.69	279.89	\$ 2,087,104
MH-148	Proyectado	1,200.00	280.86	280.13	\$ 2,092,247
MH-149	Proyectado	1,200.00	281.26	280.57	\$ 2,095,993
MH-151	Proyectado	1,200.00	283.30	282.05	\$ 2,097,018
MH-153	Proyectado	1,200.00	283.45	281.24	\$ 2,366,747
MH-154	Proyectado	1,200.00	282.39	280.78	\$ 2,158,499
MH-155	Proyectado	1,200.00	282.33	280.73	\$ 2,156,149
MH-156	Proyectado	1,200.00	281.63	280.03	\$ 2,156,149
MH-161	Proyectado	1,200.00	282.64	279.30	\$ 3,117,953
MH-163	Proyectado	1,200.00	283.25	282.26	\$ 2,082,218
MH-164	Proyectado	1,200.00	283.67	282.16	\$ 2,136,646
MH-165	Proyectado	1,200.00	283.56	282.88	\$ 2,097,022

Cámara	Condición	Diámetro	Cota Rasante	Cota de Fondo	C _{cam}
		[mm]	[m.s.n.m.]	[m.s.n.m.]	[\$COP]
MH-166	Proyectado	1,200.00	282.75	281.94	\$ 2,086,516
MH-167	Proyectado	1,200.00	282.43	281.43	\$ 2,082,328
MH-169	Proyectado	1,200.00	283.25	282.57	\$ 2,097,022
MH-170	Proyectado	1,200.00	283.00	282.15	\$ 2,084,533
MH-171	Proyectado	1,200.00	283.39	282.06	\$ 2,106,567
MH-172	Proyectado	1,200.00	281.08	280.40	\$ 2,097,022
MH-178	Proyectado	1,200.00	283.25	281.70	\$ 2,144,947
MH-179	Proyectado	1,200.00	283.31	280.42	\$ 2,762,605
MH-180	Proyectado	1,200.00	282.70	280.36	\$ 2,429,295
MH-189	Proyectado	1,200.00	282.83	281.08	\$ 2,195,264
MH-190	Proyectado	1,200.00	283.06	281.03	\$ 2,290,389
MH-191	Proyectado	1,200.00	282.76	280.31	\$ 2,487,069
MH-192	Proyectado	1,200.00	282.58	280.35	\$ 2,375,966
MH-193	Proyectado	1,200.00	282.71	280.28	\$ 2,476,234
MH-194	Proyectado	1,200.00	283.12	280.22	\$ 2,769,694
MH-195	Proyectado	1,200.00	283.53	280.16	\$ 3,144,287
MH-196	Proyectado	1,200.00	283.50	280.11	\$ 3,162,027
MH-197	Proyectado	1,200.00	283.69	280.09	\$ 3,357,166
MH-198	Proyectado	1,200.00	283.33	280.03	\$ 3,083,355
MH-199	Proyectado	1,200.00	283.26	279.97	\$ 3,074,797
MH-200	Proyectado	1,200.00	281.95	279.90	\$ 2,298,286
MH-203	Proyectado	1,200.00	283.25	281.69	\$ 2,147,114
MH-204	Proyectado	1,200.00	281.54	279.59	\$ 2,260,272
MH-205	Proyectado	1,200.00	281.50	279.55	\$ 2,260,272
MH-206	Proyectado	1,200.00	281.70	279.50	\$ 2,362,193
MH-207	Proyectado	1,200.00	281.44	279.47	\$ 2,267,581
MH-208	Proyectado	1,200.00	282.35	281.36	\$ 2,082,218
MH-209	Proyectado	1,200.00	282.35	281.13	\$ 2,094,043
MH-210	Proyectado	1,200.00	282.92	282.11	\$ 2,086,516
MH-213	Proyectado	1,200.00	282.54	281.47	\$ 2,084,127
MH-214	Proyectado	1,200.00	282.32	281.02	\$ 2,102,710
MH-215	Proyectado	1,200.00	282.39	281.00	\$ 2,115,271
MH-216	Proyectado	1,200.00	282.50	280.95	\$ 2,144,947
MH-217	Proyectado	1,200.00	282.50	280.91	\$ 2,153,835

*Costos proyectados en pesos colombianos al año 2023

Fuente: Elaboración propia

TUBERÍAS	\$ 11,170,957,966
POZOS	\$ 389,488,453
COSTOS DIRECTOS	\$ 11,560,446,419

5.6.6.2 Análisis con Tanques de Tormenta

Se calcularon unos costos de suministro de tubería, excavaciones, rellenos, entibados y pozos para cada caso.

Tabla 33 Costos de tuberías proyectadas con la implementación de tanques de tormenta.

Tramo	C _{tub}	C _{exc mecánica}	C _{exc manual}	C _{rell}	C _{ent}	C _{total}
	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]
CO-1	\$ 41,013,101	\$ 1,847,030	\$ -	\$ 179,834	\$ -	\$ 43,039,965
CO-2	\$ 40,813,037	\$ 1,818,510	\$ -	\$ 170,285	\$ -	\$ 42,801,832
CO-3	\$ 44,214,124	\$ 1,973,999	\$ -	\$ 185,760	\$ -	\$ 46,373,882
CO-6	\$ 131,642,051	\$ 5,719,847	\$ -	\$ 456,465	\$ -	\$ 137,818,363
CO-7	\$ 34,480,890	\$ 2,764,164	\$ -	\$ 362,803	\$ -	\$ 37,607,857
CO-8	\$ 13,309,047	\$ 1,145,584	\$ -	\$ 175,246	\$ -	\$ 14,629,877
CO-9	\$ 16,383,397	\$ 1,370,448	\$ -	\$ 184,131	\$ -	\$ 17,937,977
CO-10	\$ 21,637,669	\$ 2,079,973	\$ -	\$ 368,940	\$ -	\$ 24,086,581
CO-13	\$ 8,630,703	\$ 1,014,044	\$ -	\$ 209,328	\$ -	\$ 9,854,075
CO-14	\$ 13,004,450	\$ -	\$ 3,739,193	\$ 1,604,238	\$ 7,762,131	\$ 26,110,013
CO-15	\$ 12,953,652	\$ -	\$ 4,379,838	\$ 1,989,565	\$ 9,188,437	\$ 28,511,491
CO-16	\$ 12,804,096	\$ -	\$ 3,660,122	\$ 1,559,617	\$ 6,503,676	\$ 24,527,511
CO-18	\$ 28,132,944	\$ 2,321,505	\$ -	\$ 326,869	\$ -	\$ 30,781,318
CO-19	\$ 3,971,360	\$ 547,173	\$ -	\$ 114,041	\$ -	\$ 4,632,574
CO-20	\$ 30,657,695	\$ 2,482,266	\$ -	\$ 334,098	\$ -	\$ 33,474,059
CO-21	\$ 18,079,658	\$ 1,550,738	\$ -	\$ 220,706	\$ -	\$ 19,851,102
CO-22	\$ 17,817,531	\$ 1,636,302	\$ -	\$ 282,849	\$ -	\$ 19,736,682
CO-23	\$ 17,781,463	\$ 2,047,962	\$ -	\$ 478,888	\$ -	\$ 20,308,314
CO-24	\$ 12,369,467	\$ 1,304,866	\$ -	\$ 276,012	\$ -	\$ 13,950,345
CO-25	\$ 7,987,784	\$ 830,619	\$ -	\$ 144,462	\$ -	\$ 8,962,865
CO-26	\$ 2,762,685	\$ 340,149	\$ -	\$ 60,921	\$ -	\$ 3,163,755
CO-28	\$ 50,972,809	\$ -	\$ 9,140,630	\$ 4,025,820	\$ 14,046,886	\$ 78,186,145
CO-29	\$ 21,914,186	\$ -	\$ 3,949,835	\$ 1,549,485	\$ 5,705,767	\$ 33,119,273
CO-30	\$ 6,663,561	\$ -	\$ 1,229,626	\$ 412,998	\$ 1,629,738	\$ 9,935,923
CO-31	\$ 17,723,699	\$ -	\$ 3,398,975	\$ 1,334,659	\$ 4,855,056	\$ 27,312,389

Tramo	C _{tub}	C _{exc mecánica}	C _{exc manual}	C _{rell}	C _{ent}	C _{total}
	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]
CO-32	\$ 7,487,919	\$ -	\$ 1,569,827	\$ 570,106	\$ 2,117,654	\$ 11,745,506
CO-33	\$ 40,012,782	\$ -	\$ 5,796,424	\$ 2,416,177	\$ 8,095,040	\$ 56,320,422
CO-34	\$ 25,408,116	\$ -	\$ 3,795,809	\$ 1,507,469	\$ 5,137,783	\$ 35,849,178
CO-35	\$ 29,622,506	\$ 2,889,211	\$ -	\$ 528,285	\$ -	\$ 33,040,002
CO-36	\$ 29,250,156	\$ 2,851,992	\$ -	\$ 521,072	\$ -	\$ 32,623,221
CO-37	\$ 19,405,078	\$ 2,275,299	\$ -	\$ 549,220	\$ -	\$ 22,229,597
CO-38	\$ 12,762,009	\$ 2,343,292	\$ -	\$ 679,238	\$ -	\$ 15,784,539
CO-39	\$ 29,214,980	\$ 3,722,784	\$ -	\$ 979,342	\$ -	\$ 33,917,106
CO-40	\$ 95,230,420	\$ 6,158,624	\$ -	\$ 1,170,319	\$ -	\$ 102,559,362
CO-41	\$ 7,227,382	\$ 1,047,450	\$ -	\$ 235,514	\$ -	\$ 8,510,346
CO-42	\$ 41,622,330	\$ 3,250,943	\$ -	\$ 397,332	\$ -	\$ 45,270,605
CO-43	\$ 15,545,255	\$ 1,667,187	\$ -	\$ 358,076	\$ -	\$ 17,570,517
CO-44	\$ 9,371,034	\$ 1,543,104	\$ -	\$ 436,666	\$ -	\$ 11,350,804
CO-45	\$ 8,226,389	\$ 1,124,387	\$ -	\$ 237,788	\$ -	\$ 9,588,564
CO-46	\$ 15,780,744	\$ 1,882,306	\$ -	\$ 403,303	\$ -	\$ 18,066,352
CO-47	\$ 14,833,201	\$ 1,472,435	\$ -	\$ 289,593	\$ -	\$ 16,595,229
CO-48	\$ 18,899,568	\$ 1,731,754	\$ -	\$ 298,544	\$ -	\$ 20,929,866
CO-49	\$ 11,289,245	\$ 644,947	\$ -	\$ 10,822	\$ -	\$ 11,945,014
CO-50	\$ 45,806,204	\$ 4,291,118	\$ -	\$ 781,295	\$ -	\$ 50,878,617
CO-51	\$ 16,446,952	\$ 1,496,177	\$ -	\$ 254,096	\$ -	\$ 18,197,225
CO-52	\$ 19,963,863	\$ -	\$ 5,690,504	\$ 2,579,210	\$ 12,184,188	\$ 40,417,765
CO-53	\$ 21,280,047	\$ -	\$ 5,321,014	\$ 2,302,105	\$ 9,726,179	\$ 38,629,346
CO-54	\$ 31,442,884	\$ -	\$ 7,418,913	\$ 3,268,705	\$ 12,913,390	\$ 55,043,891
CO-55	\$ 4,921,033	\$ 791,260	\$ -	\$ 193,764	\$ -	\$ 5,906,057
CO-56	\$ 18,719,228	\$ 1,561,034	\$ -	\$ 224,517	\$ -	\$ 20,504,779
CO-58	\$ 13,958,268	\$ 1,089,221	\$ -	\$ 133,700	\$ -	\$ 15,181,189
CO-59	\$ 15,905,934	\$ 1,358,965	\$ -	\$ 205,296	\$ -	\$ 17,470,195
CO-60	\$ 31,796,825	\$ 2,317,315	\$ -	\$ 283,154	\$ -	\$ 34,397,294
CO-61	\$ 11,425,300	\$ 900,368	\$ -	\$ 131,996	\$ -	\$ 12,457,663

Tramo	C _{tub}	C _{exc mecánica}	C _{exc manual}	C _{rell}	C _{ent}	C _{total}
	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]
CO-62	\$ 13,311,552	\$ 1,167,484	\$ -	\$ 207,632	\$ -	\$ 14,686,667
CO-63	\$ 53,263,616	\$ 2,197,001	\$ -	\$ 244,800	\$ -	\$ 55,705,417
CO-64	\$ 70,157,505	\$ 2,324,331	\$ -	\$ 201,103	\$ -	\$ 72,682,939
CO-65	\$ 23,975,081	\$ 1,416,773	\$ -	\$ 170,471	\$ -	\$ 25,562,325
CO-67	\$ 20,234,079	\$ 1,655,997	\$ -	\$ 228,472	\$ -	\$ 22,118,548
CO-69	\$ 15,950,771	\$ 1,499,327	\$ -	\$ 272,833	\$ -	\$ 17,722,931
CO-70	\$ 17,096,174	\$ 1,498,321	\$ -	\$ 238,086	\$ -	\$ 18,832,581
CO-71	\$ 2,416,548	\$ 224,503	\$ -	\$ 37,790	\$ -	\$ 2,678,840
CO-72	\$ 2,323,108	\$ -	\$ 793,707	\$ 272,075	\$ 1,656,119	\$ 5,045,009
CO-73	\$ 6,039,544	\$ -	\$ 1,777,439	\$ 671,264	\$ 3,703,455	\$ 12,191,702
CO-74	\$ 2,259,958	\$ -	\$ 723,605	\$ 247,310	\$ 1,410,213	\$ 4,641,086
CO-75	\$ 2,980,807	\$ -	\$ 965,555	\$ 344,314	\$ 1,921,850	\$ 6,212,526
CO-76	\$ 7,188,007	\$ -	\$ 1,946,768	\$ 752,471	\$ 3,853,601	\$ 13,740,846
CO-77	\$ 15,437,051	\$ -	\$ 3,466,020	\$ 1,366,303	\$ 6,142,832	\$ 26,412,207
CO-78	\$ 9,738,327	\$ -	\$ 2,289,996	\$ 865,349	\$ 3,935,463	\$ 16,829,134
CO-79	\$ 17,096,174	\$ -	\$ 4,066,719	\$ 1,670,162	\$ 7,290,028	\$ 30,123,081
CO-80	\$ 8,872,698	\$ -	\$ 2,283,198	\$ 886,662	\$ 3,920,754	\$ 15,963,311
CO-81	\$ 5,915,132	\$ -	\$ 1,576,298	\$ 587,618	\$ 2,633,488	\$ 10,712,537
CO-82	\$ 11,938,467	\$ -	\$ 3,169,600	\$ 1,298,977	\$ 5,574,938	\$ 21,981,983
CO-83	\$ 8,944,833	\$ -	\$ 2,461,014	\$ 983,705	\$ 4,247,891	\$ 16,637,444
CO-84	\$ 16,176,536	\$ -	\$ 4,089,764	\$ 1,695,435	\$ 6,810,852	\$ 28,772,588
CO-85	\$ 1,640,344	\$ 221,065	\$ -	\$ 43,628	\$ -	\$ 1,905,037
CO-87	\$ 6,055,708	\$ 843,201	\$ -	\$ 180,373	\$ -	\$ 7,079,281
CO-87A	\$ 17,132,242	\$ 1,577,684	\$ -	\$ 273,763	\$ -	\$ 18,983,689
CO-88	\$ 14,757,003	\$ 1,427,625	\$ -	\$ 270,729	\$ -	\$ 16,455,357
CO-88A	\$ 23,623,535	\$ 2,283,483	\$ -	\$ 409,495	\$ -	\$ 26,316,513
CO-89	\$ 55,509,711	\$ -	\$ 10,855,623	\$ 4,898,663	\$ 18,097,267	\$ 89,361,264
CO-89A	\$ 17,853,599	\$ 1,499,282	\$ -	\$ 218,814	\$ -	\$ 19,571,695
CO-90	\$ 13,817,228	\$ -	\$ 3,854,739	\$ 1,648,263	\$ 8,021,715	\$ 27,341,945

Tramo	C _{tub}	C _{exc mecánica}	C _{exc manual}	C _{rell}	C _{ent}	C _{total}
	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]
CO-90A	\$ 18,430,685	\$ 1,599,398	\$ -	\$ 249,633	\$ -	\$ 20,279,716
CO-91	\$ 14,643,558	\$ 1,378,154	\$ -	\$ 246,912	\$ -	\$ 16,268,623
CO-92	\$ 18,782,986	\$ 1,853,444	\$ -	\$ 341,802	\$ -	\$ 20,978,231
CO-93	\$ 22,134,135	\$ 2,250,216	\$ -	\$ 435,742	\$ -	\$ 24,820,092
CO-94	\$ 22,096,098	\$ 1,933,453	\$ -	\$ 346,393	\$ -	\$ 24,375,944
CO-95	\$ 27,952,605	\$ 2,161,636	\$ -	\$ 257,785	\$ -	\$ 30,372,026
CO-96	\$ 26,185,279	\$ 2,021,661	\$ -	\$ 240,123	\$ -	\$ 28,447,063
CO-97	\$ 17,024,038	\$ 1,829,935	\$ -	\$ 395,240	\$ -	\$ 19,249,213
CO-98	\$ 9,312,587	\$ 972,102	\$ -	\$ 170,677	\$ -	\$ 10,455,367
CO-99	\$ 16,338,748	\$ 1,246,663	\$ -	\$ 143,826	\$ -	\$ 17,729,237
CO-100	\$ 10,279,345	\$ 796,028	\$ -	\$ 95,884	\$ -	\$ 11,171,256
CO-106	\$ 6,119,778	\$ 1,060,776	\$ -	\$ 224,677	\$ -	\$ 7,405,231
CO-107	\$ 16,763,549	\$ 1,521,461	\$ -	\$ 261,884	\$ -	\$ 18,546,894
CO-108	\$ 7,361,537	\$ 803,506	\$ -	\$ 128,156	\$ -	\$ 8,293,198
CO-109	\$ 5,189,280	\$ 635,126	\$ -	\$ 119,996	\$ -	\$ 5,944,403
CO-110	\$ 11,150,300	\$ 1,108,250	\$ -	\$ 216,624	\$ -	\$ 12,475,174
CO-111	\$ 9,880,334	\$ 979,062	\$ -	\$ 189,949	\$ -	\$ 11,049,345
CO-112	\$ 9,296,150	\$ 858,254	\$ -	\$ 150,012	\$ -	\$ 10,304,416
CO-113	\$ 22,796,706	\$ 1,749,662	\$ -	\$ 243,643	\$ -	\$ 24,790,012
CO-114	\$ 30,776,035	\$ 2,202,051	\$ -	\$ 318,186	\$ -	\$ 33,296,272
CO-115	\$ 11,329,122	\$ 438,907	\$ -	\$ 34,300	\$ -	\$ 11,802,329
CO-116	\$ 2,084,617	\$ -	\$ 811,053	\$ 294,847	\$ 1,591,304	\$ 4,781,821
CO-117	\$ 5,084,906	\$ -	\$ 1,967,663	\$ 804,928	\$ 4,120,792	\$ 11,978,290
CO-118	\$ 2,260,539	\$ -	\$ 752,633	\$ 268,893	\$ 1,387,146	\$ 4,669,211
CO-119	\$ 12,840,164	\$ -	\$ 3,348,485	\$ 1,375,799	\$ 5,914,028	\$ 23,478,476
CO-120	\$ 29,425,536	\$ -	\$ 6,077,976	\$ 2,577,576	\$ 9,706,440	\$ 47,787,528
CO-121	\$ 13,601,909	\$ -	\$ 2,562,074	\$ 961,083	\$ 3,584,355	\$ 20,709,421
CO-122	\$ 38,813,527	\$ -	\$ 7,005,459	\$ 2,979,525	\$ 10,556,375	\$ 59,354,886
CO-123	\$ 3,244,946	\$ 588,318	\$ -	\$ 128,206	\$ -	\$ 3,961,469

Tramo	C _{tub}	C _{exc mecánica}	C _{exc manual}	C _{rell}	C _{ent}	C _{total}
	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]
CO-124	\$ 10,972,505	\$ 980,820	\$ -	\$ 163,182	\$ -	\$ 12,116,507
CO-125	\$ 8,534,170	\$ 1,022,794	\$ -	\$ 244,612	\$ -	\$ 9,801,576
CO-126	\$ 10,964,635	\$ 828,312	\$ -	\$ 93,238	\$ -	\$ 11,886,184
CO-127	\$ 9,557,987	\$ 719,574	\$ -	\$ 80,315	\$ -	\$ 10,357,876
CO-128	\$ 18,502,821	\$ 1,561,515	\$ -	\$ 230,367	\$ -	\$ 20,294,703
CO-129	\$ 23,700,295	\$ 1,465,718	\$ -	\$ 140,982	\$ -	\$ 25,306,995
CO-130	\$ 29,264,712	\$ 1,819,410	\$ -	\$ 177,295	\$ -	\$ 31,261,417
CO-132	\$ 6,429,192	\$ 664,929	\$ -	\$ 114,107	\$ -	\$ 7,208,227
CO-133	\$ 3,749,359	\$ 465,169	\$ -	\$ 84,896	\$ -	\$ 4,299,423
CO-134	\$ 3,167,480	\$ 503,198	\$ -	\$ 93,604	\$ -	\$ 3,764,282
CO-135	\$ 35,241,308	\$ 2,130,850	\$ -	\$ 185,398	\$ -	\$ 37,557,556
CO-137	\$ 31,689,039	\$ -	\$ 7,233,315	\$ 3,242,659	\$ 11,696,033	\$ 53,861,047
CO-138	\$ 22,203,884	\$ -	\$ 4,705,601	\$ 1,942,323	\$ 7,373,639	\$ 36,225,447
CO-139	\$ 18,862,523	\$ -	\$ 3,793,098	\$ 1,492,186	\$ 5,851,377	\$ 29,999,184
CO-140	\$ 17,191,842	\$ -	\$ 3,030,264	\$ 1,096,575	\$ 4,600,711	\$ 25,919,393
CO-146	\$ 23,985,138	\$ 2,277,062	\$ -	\$ 418,165	\$ -	\$ 26,680,366
CO-147	\$ 32,022,095	\$ 2,942,025	\$ -	\$ 484,850	\$ -	\$ 35,448,970
CO-148	\$ 4,260,605	\$ 711,029	\$ -	\$ 142,218	\$ -	\$ 5,113,852
CO-149	\$ 9,565,858	\$ 999,210	\$ -	\$ 175,728	\$ -	\$ 10,740,796
CO-150	\$ 27,772,265	\$ 2,147,343	\$ -	\$ 255,979	\$ -	\$ 30,175,587
CO-151	\$ 4,097,067	\$ 703,079	\$ -	\$ 145,274	\$ -	\$ 4,945,420
CO-152	\$ 10,896,307	\$ 1,091,439	\$ -	\$ 215,421	\$ -	\$ 12,203,168
CO-153	\$ 7,467,399	\$ -	\$ 1,502,617	\$ 507,657	\$ 2,926,388	\$ 12,404,062
CO-154	\$ 19,079,907	\$ -	\$ 4,736,948	\$ 2,012,702	\$ 8,585,147	\$ 34,414,704
CO-154A	\$ 13,453,318	\$ -	\$ 3,867,957	\$ 1,662,977	\$ 6,900,782	\$ 25,885,034
CO-155	\$ 16,338,748	\$ 1,324,502	\$ -	\$ 178,594	\$ -	\$ 17,841,844
CO-155A	\$ 21,676,794	\$ -	\$ 5,838,192	\$ 2,611,067	\$ 10,740,150	\$ 40,866,204
CO-156	\$ 17,448,913	\$ 978,680	\$ -	\$ 101,379	\$ -	\$ 18,528,972
CO-156A	\$ 5,554,453	\$ -	\$ 1,485,274	\$ 549,717	\$ 2,470,526	\$ 10,059,971

Tramo	C _{tub}	C _{exc mecánica}	C _{exc manual}	C _{rell}	C _{ent}	C _{total}
	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]
CO-157	\$ 15,148,508	\$ 1,266,903	\$ -	\$ 183,034	\$ -	\$ 16,598,446
CO-158	\$ 18,245,147	\$ 1,752,247	\$ -	\$ 309,260	\$ -	\$ 20,306,654
CO-159	\$ 25,275,781	\$ 2,312,946	\$ -	\$ 445,529	\$ -	\$ 28,034,256
CO-160	\$ 24,575,096	\$ -	\$ 5,696,076	\$ 2,405,234	\$ 9,724,443	\$ 42,400,849
CO-161	\$ 25,417,708	\$ -	\$ 4,682,324	\$ 1,896,006	\$ 6,848,797	\$ 38,844,835
CO-162	\$ 15,359,483	\$ 1,175,284	\$ -	\$ 162,219	\$ -	\$ 16,696,986
CO-163	\$ 24,629,066	\$ 2,298,020	\$ -	\$ 454,990	\$ -	\$ 27,382,076
CO-163A	\$ 17,997,871	\$ 2,477,177	\$ -	\$ 682,216	\$ -	\$ 21,157,264
CO-164	\$ 33,507,058	\$ 3,277,712	\$ -	\$ 635,377	\$ -	\$ 37,420,147
CO-164A	\$ 9,594,055	\$ -	\$ 1,519,587	\$ 455,672	\$ 2,541,841	\$ 14,111,155
CO-165	\$ 12,154,875	\$ -	\$ 3,247,609	\$ 1,337,706	\$ 5,722,176	\$ 22,462,365
CO-166	\$ 17,601,124	\$ 1,978,238	\$ -	\$ 450,331	\$ -	\$ 20,029,693
CO-167	\$ 11,000,702	\$ -	\$ 3,089,919	\$ 1,280,945	\$ 5,422,939	\$ 20,794,505
CO-168	\$ 19,188,111	\$ -	\$ 5,669,121	\$ 2,584,021	\$ 10,401,592	\$ 37,842,845
CO-169	\$ 25,067,174	\$ -	\$ 8,269,111	\$ 4,062,324	\$ 15,591,779	\$ 52,990,388
CO-170	\$ 13,813,997	\$ -	\$ 5,026,065	\$ 2,353,911	\$ 9,131,787	\$ 30,325,759
CO-171	\$ 7,862,797	\$ -	\$ 3,014,165	\$ 1,331,011	\$ 5,272,818	\$ 17,480,791
CO-172	\$ 28,422,712	\$ -	\$ 9,796,752	\$ 4,934,347	\$ 17,377,297	\$ 60,531,107
CO-173	\$ 23,706,279	\$ -	\$ 8,237,328	\$ 4,060,028	\$ 14,425,304	\$ 50,428,939
CO-174	\$ 27,140,173	\$ -	\$ 8,642,453	\$ 4,210,196	\$ 15,193,185	\$ 55,186,007
CO-175	\$ 24,305,708	\$ -	\$ 5,833,181	\$ 2,575,479	\$ 9,282,021	\$ 41,996,389
CO-176	\$ 3,936,894	\$ -	\$ 1,058,159	\$ 375,441	\$ 2,002,911	\$ 7,373,405
CO-177	\$ 44,414,188	\$ -	\$ 6,510,866	\$ 2,769,809	\$ 9,170,853	\$ 62,865,716
CO-178	\$ 46,314,795	\$ -	\$ 7,139,329	\$ 3,128,128	\$ 10,123,621	\$ 66,705,872
CO-179	\$ 32,410,353	\$ -	\$ 5,189,580	\$ 2,201,848	\$ 7,187,231	\$ 46,989,012
CO-180	\$ 23,421,736	\$ -	\$ 2,926,471	\$ 1,111,945	\$ 3,657,197	\$ 31,117,350
CO-181	\$ 10,026,870	\$ 833,339	\$ -	\$ 118,380	\$ -	\$ 10,978,589
CO-182	\$ 26,654,245	\$ 1,647,377	\$ -	\$ 157,573	\$ -	\$ 28,459,196
CO-186	\$ 11,066,003	\$ 1,199,970	\$ -	\$ 224,121	\$ -	\$ 12,490,094

Tramo	C _{tub}	C _{exc mecánica}	C _{exc manual}	C _{rell}	C _{ent}	C _{total}
	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]	[\$COP]
CO-187	\$ 19,486,313	\$ 1,637,086	\$ -	\$ 222,323	\$ -	\$ 21,345,722
CO-188	\$ 21,006,710	\$ 990,721	\$ -	\$ 85,085	\$ -	\$ 22,082,516
CO-189	\$ 66,517,731	\$ 2,764,151	\$ -	\$ 257,337	\$ -	\$ 69,539,219
CO-190	\$ 56,951,804	\$ 2,317,490	\$ -	\$ 207,397	\$ -	\$ 59,476,690
CO-191	\$ 37,355,484	\$ 1,604,722	\$ -	\$ 175,691	\$ -	\$ 39,135,897
CO-192	\$ 8,274,443	\$ -	\$ 2,157,095	\$ 826,300	\$ 3,426,463	\$ 14,684,301
CO-193	\$ 9,763,843	\$ -	\$ 2,715,913	\$ 1,093,832	\$ 4,386,625	\$ 17,960,213
CO-194	\$ 8,946,225	\$ -	\$ 2,166,403	\$ 837,044	\$ 3,204,504	\$ 15,154,175
CO-195	\$ 3,125,790	\$ -	\$ 796,009	\$ 271,922	\$ 1,093,495	\$ 5,287,216
CO-196	\$ 23,335,636	\$ -	\$ 5,706,550	\$ 2,525,025	\$ 9,065,248	\$ 40,632,460
CO-197	\$ 18,161,915	\$ -	\$ 4,566,662	\$ 1,974,725	\$ 7,135,607	\$ 31,838,909
CO-198	\$ 28,909,114	\$ -	\$ 2,534,613	\$ 799,551	\$ 3,135,749	\$ 35,379,027
CO-199	\$ 11,694,764	\$ -	\$ 1,948,016	\$ 644,795	\$ 2,863,728	\$ 17,151,303
CO-200	\$ 2,143,064	\$ -	\$ 802,258	\$ 288,818	\$ 1,573,264	\$ 4,807,404
CO-201	\$ 15,736,734	\$ -	\$ 3,357,440	\$ 1,325,239	\$ 5,131,702	\$ 25,551,114
CO-204	\$ 11,810,682	\$ -	\$ 3,124,711	\$ 1,280,392	\$ 6,405,521	\$ 22,621,306
CO-205	\$ 752,338	\$ -	\$ 294,697	\$ 90,704	\$ 606,174	\$ 1,743,913
CO-206	\$ 4,792,670	\$ -	\$ 1,445,343	\$ 534,240	\$ 2,965,379	\$ 9,737,632

*Costos proyectados en pesos colombianos al año 2023

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34 Costos de pozos con la implementación de los tanques de tormenta en la modelación.

Cámara	Condición	Diámetro	Cota Rasante	Cota de Fondo	C _{cam}
		[mm]	[m.s.n.m.]	[m.s.n.m.]	[\$COP]
MH-1	Proyectado	1,200.00	282.89	280.95	\$ 2,256,673
MH-2	Proyectado	1,200.00	282.40	280.49	\$ 2,246,095
MH-3	Proyectado	1,200.00	282.10	280.19	\$ 2,246,095
MH-4	Proyectado	1,200.00	282.03	280.12	\$ 2,246,095
MH-5	Proyectado	1,200.00	280.88	279.88	\$ 2,082,328
MH-6	Proyectado	1,200.00	278.90	277.75	\$ 2,088,387
MH-7	Proyectado	1,200.00	278.50	277.35	\$ 2,088,387
MH-8	Proyectado	1,200.00	278.20	276.98	\$ 2,094,043

Cámara	Condición	Diámetro	Cota Rasante	Cota de Fondo	C _{cam}
		[mm]	[m.s.n.m.]	[m.s.n.m.]	[\$COP]
MH-9	Proyectado	1,200.00	282.60	281.61	\$ 2,082,218
MH-10	Proyectado	1,200.00	282.50	279.52	\$ 2,827,725
MH-11	Proyectado	1,200.00	283.50	279.33	\$ 3,968,476
MH-12	Proyectado	1,200.00	283.50	279.20	\$ 4,124,609
MH-13	Proyectado	1,200.00	283.49	279.05	\$ 4,299,694
MH-14	Proyectado	1,200.00	283.34	282.27	\$ 2,084,127
MH-15	Proyectado	1,200.00	283.25	282.52	\$ 2,092,247
MH-16	Proyectado	1,200.00	282.67	281.68	\$ 2,082,218
MH-17	Proyectado	1,200.00	282.50	280.90	\$ 2,156,149
MH-18	Proyectado	1,200.00	282.98	281.91	\$ 2,084,127
MH-19	Proyectado	1,200.00	282.51	281.13	\$ 2,113,728
MH-20	Proyectado	1,200.00	282.60	281.60	\$ 2,082,328
MH-21	Proyectado	1,200.00	282.50	281.20	\$ 2,102,710
MH-22	Proyectado	1,200.00	282.79	281.98	\$ 2,086,516
MH-23	Proyectado	1,200.00	283.01	282.28	\$ 2,092,247
MH-24	Proyectado	1,200.00	282.30	277.95	\$ 4,186,313
MH-25	Proyectado	1,200.00	281.96	277.63	\$ 4,161,521
MH-26	Proyectado	1,200.00	281.61	277.49	\$ 3,910,077
MH-27	Proyectado	1,200.00	281.60	277.43	\$ 3,968,476
MH-28	Proyectado	1,200.00	282.10	277.31	\$ 4,768,902
MH-29	Proyectado	1,200.00	282.00	277.25	\$ 4,713,001
MH-30	Proyectado	1,200.00	281.80	276.80	\$ 5,072,023
MH-31	Proyectado	1,200.00	281.75	280.68	\$ 2,084,127
MH-32	Proyectado	1,200.00	282.20	281.13	\$ 2,084,127
MH-33	Proyectado	1,200.00	281.75	280.90	\$ 2,084,533
MH-34	Proyectado	1,200.00	281.96	281.20	\$ 2,089,822
MH-35	Proyectado	1,200.00	281.80	280.81	\$ 2,082,218
MH-36	Proyectado	1,200.00	282.20	280.90	\$ 2,102,710
MH-37	Proyectado	1,200.00	282.50	281.43	\$ 2,084,127
MH-38	Proyectado	1,200.00	283.12	282.40	\$ 2,093,128
MH-39	Proyectado	1,200.00	282.73	281.74	\$ 2,082,218
MH-40	Proyectado	1,200.00	282.18	281.19	\$ 2,082,218
MH-43	Proyectado	1,200.00	280.11	279.11	\$ 2,082,328
MH-44	Proyectado	1,200.00	279.08	278.01	\$ 2,084,127
MH-45	Proyectado	1,200.00	278.68	277.61	\$ 2,084,127
MH-46	Proyectado	1,200.00	278.19	276.82	\$ 2,112,223
MH-48	Proyectado	1,200.00	283.65	282.43	\$ 2,094,043
MH-49	Proyectado	1,200.00	283.54	282.25	\$ 2,101,498
MH-50	Proyectado	1,200.00	283.26	279.75	\$ 3,271,552
MH-51	Proyectado	1,200.00	283.08	279.20	\$ 3,642,546
MH-52	Proyectado	1,200.00	282.54	278.72	\$ 3,578,969

Cámara	Condición	Diámetro	Cota Rasante	Cota de Fondo	C _{cam}
		[mm]	[m.s.n.m.]	[m.s.n.m.]	[\$COP]
MH-53	Proyectado	1,200.00	282.00	278.01	\$ 3,762,539
MH-54	Proyectado	1,200.00	282.00	280.97	\$ 2,082,879
MH-55	Proyectado	1,200.00	281.09	276.10	\$ 5,057,221
MH-56	Proyectado	1,200.00	283.25	282.26	\$ 2,082,218
MH-57	Proyectado	1,200.00	283.25	282.20	\$ 2,083,429
MH-58	Proyectado	1,200.00	283.18	281.97	\$ 2,093,125
MH-59	Proyectado	1,200.00	283.00	281.72	\$ 2,100,323
MH-60	Proyectado	1,200.00	283.00	281.50	\$ 2,134,663
MH-61	Proyectado	1,200.00	282.77	281.16	\$ 2,158,499
MH-62	Proyectado	1,200.00	282.77	281.01	\$ 2,198,165
MH-63	Proyectado	1,200.00	282.98	280.99	\$ 2,275,037
MH-64	Proyectado	1,200.00	283.01	282.01	\$ 2,082,328
MH-65	Proyectado	1,200.00	282.60	281.45	\$ 2,088,387
MH-66	Proyectado	1,200.00	282.95	282.10	\$ 2,084,533
MH-67	Proyectado	1,200.00	283.19	282.12	\$ 2,084,127
MH-68	Proyectado	1,200.00	283.23	281.91	\$ 2,105,244
MH-69	Proyectado	1,200.00	283.00	280.45	\$ 2,543,447
MH-70	Proyectado	1,200.00	283.13	280.40	\$ 2,654,183
MH-71	Proyectado	1,200.00	283.25	280.25	\$ 2,842,600
MH-72	Proyectado	1,200.00	281.86	280.41	\$ 2,125,297
MH-73	Proyectado	1,200.00	282.50	278.41	\$ 3,875,479
MH-74	Proyectado	1,200.00	283.46	280.00	\$ 3,225,274
MH-75	Proyectado	1,200.00	283.25	280.05	\$ 2,999,430
MH-76	Proyectado	1,200.00	283.25	279.92	\$ 3,109,248
MH-77	Proyectado	1,200.00	283.25	279.80	\$ 3,216,128
MH-78	Proyectado	1,200.00	283.25	279.70	\$ 3,309,235
MH-79	Proyectado	1,200.00	283.24	279.45	\$ 3,547,677
MH-80	Proyectado	1,200.00	283.25	279.36	\$ 3,653,271
MH-81	Proyectado	1,200.00	283.25	279.25	\$ 3,773,667
MH-82	Proyectado	1,200.00	283.25	279.16	\$ 3,875,479
MH-83	Proyectado	1,200.00	283.25	279.06	\$ 3,992,092
MH-84	Proyectado	1,200.00	282.40	281.67	\$ 2,092,247
MH-85	Proyectado	1,200.00	281.80	280.65	\$ 2,088,387
MH-86	Proyectado	1,200.00	283.12	279.38	\$ 3,496,257
MH-87	Proyectado	1,200.00	283.25	282.18	\$ 2,084,127
MH-88	Proyectado	1,200.00	282.45	281.72	\$ 2,092,247
MH-89	Proyectado	1,200.00	281.87	280.87	\$ 2,082,328
MH-90	Proyectado	1,200.00	281.80	280.73	\$ 2,084,127
MH-91	Proyectado	1,200.00	281.53	280.38	\$ 2,088,387
MH-92	Proyectado	1,200.00	280.93	279.78	\$ 2,088,387
MH-93	Proyectado	1,200.00	280.18	278.81	\$ 2,112,223

Cámara	Condición	Diámetro	Cota Rasante	Cota de Fondo	C _{cam}
		[mm]	[m.s.n.m.]	[m.s.n.m.]	[\$COP]
MH-94	Proyectado	1,200.00	280.05	278.59	\$ 2,127,097
MH-95	Proyectado	1,200.00	279.64	278.19	\$ 2,125,297
MH-98	Proyectado	1,200.00	283.65	282.65	\$ 2,082,328
MH-99	Proyectado	1,200.00	283.24	282.24	\$ 2,082,328
MH-100	Proyectado	1,200.00	282.72	281.73	\$ 2,082,218
MH-101	Proyectado	1,200.00	282.61	280.70	\$ 2,246,095
MH-102	Proyectado	1,200.00	283.00	282.19	\$ 2,086,516
MH-103	Proyectado	1,200.00	282.75	281.76	\$ 2,082,218
MH-104	Proyectado	1,200.00	282.49	281.49	\$ 2,082,328
MH-111	Proyectado	1,200.00	279.55	278.48	\$ 2,084,127
MH-112	Proyectado	1,200.00	280.10	279.42	\$ 2,097,022
MH-113	Proyectado	1,200.00	279.88	279.03	\$ 2,084,533
MH-114	Proyectado	1,200.00	279.14	278.38	\$ 2,089,822
MH-115	Proyectado	1,200.00	279.00	278.24	\$ 2,089,822
MH-116	Proyectado	1,200.00	278.50	277.51	\$ 2,082,218
MH-117	Proyectado	1,200.00	278.60	277.44	\$ 2,089,085
MH-118	Proyectado	1,200.00	278.25	277.26	\$ 2,082,218
MH-121	Proyectado	1,200.00	281.75	280.45	\$ 2,102,710
MH-122	Proyectado	1,200.00	281.45	280.15	\$ 2,102,710
MH-123	Proyectado	1,200.00	282.81	278.95	\$ 3,621,207
MH-124	Proyectado	1,200.00	282.80	281.30	\$ 2,134,663
MH-125	Proyectado	1,200.00	282.57	281.12	\$ 2,125,297
MH-126	Proyectado	1,200.00	282.75	279.10	\$ 3,406,015
MH-127	Proyectado	1,200.00	282.76	279.02	\$ 3,496,257
MH-128	Proyectado	1,200.00	282.75	278.91	\$ 3,600,015
MH-129	Proyectado	1,200.00	282.75	278.86	\$ 3,653,271
MH-130	Proyectado	1,200.00	282.65	278.68	\$ 3,740,391
MH-131	Proyectado	1,200.00	282.67	278.20	\$ 4,338,149
MH-132	Proyectado	1,200.00	282.46	278.10	\$ 4,198,764
MH-133	Proyectado	1,200.00	282.75	278.45	\$ 4,124,609
MH-134	Proyectado	1,200.00	282.55	280.85	\$ 2,181,307
MH-136	Proyectado	1,200.00	282.66	281.89	\$ 2,089,088
MH-137	Proyectado	1,200.00	282.66	281.78	\$ 2,083,431
MH-138	Proyectado	1,200.00	282.73	281.69	\$ 2,083,136
MH-139	Proyectado	1,200.00	279.10	277.49	\$ 2,158,499
MH-141	Proyectado	1,200.00	280.39	279.39	\$ 2,082,328
MH-142	Proyectado	1,200.00	280.32	279.33	\$ 2,082,218
MH-143	Proyectado	1,200.00	280.07	279.08	\$ 2,082,218
MH-144	Proyectado	1,200.00	279.48	278.25	\$ 2,094,998
MH-145	Proyectado	1,200.00	279.53	278.22	\$ 2,103,959
MH-146	Proyectado	1,200.00	279.30	278.08	\$ 2,094,043

Cámara	Condición	Diámetro	Cota Rasante	Cota de Fondo	C _{cam}
		[mm]	[m.s.n.m.]	[m.s.n.m.]	[\$COP]
MH-147	Proyectado	1,200.00	280.69	279.89	\$ 2,087,104
MH-148	Proyectado	1,200.00	280.86	280.13	\$ 2,092,247
MH-149	Proyectado	1,200.00	281.26	280.57	\$ 2,095,993
MH-151	Proyectado	1,200.00	283.30	282.05	\$ 2,097,018
MH-153	Proyectado	1,200.00	283.45	278.36	\$ 5,206,890
MH-154	Proyectado	1,200.00	282.39	278.20	\$ 3,992,092
MH-155	Proyectado	1,200.00	282.33	278.06	\$ 4,088,027
MH-156	Proyectado	1,200.00	281.63	277.94	\$ 3,445,755
MH-161	Proyectado	1,200.00	282.64	279.30	\$ 3,117,953
MH-163	Proyectado	1,200.00	283.25	282.26	\$ 2,082,218
MH-164	Proyectado	1,200.00	283.67	282.16	\$ 2,136,646
MH-165	Proyectado	1,200.00	283.56	282.88	\$ 2,097,022
MH-166	Proyectado	1,200.00	282.75	281.94	\$ 2,086,516
MH-167	Proyectado	1,200.00	282.43	281.43	\$ 2,082,328
MH-169	Proyectado	1,200.00	283.25	282.57	\$ 2,097,022
MH-170	Proyectado	1,200.00	283.00	282.15	\$ 2,084,533
MH-171	Proyectado	1,200.00	283.39	282.06	\$ 2,106,567
MH-172	Proyectado	1,200.00	281.08	280.40	\$ 2,097,022
MH-178	Proyectado	1,200.00	283.25	280.20	\$ 2,880,430
MH-179	Proyectado	1,200.00	283.31	278.94	\$ 4,211,252
MH-180	Proyectado	1,200.00	282.70	278.71	\$ 3,762,539
MH-189	Proyectado	1,200.00	282.83	281.08	\$ 2,195,264
MH-190	Proyectado	1,200.00	283.06	281.03	\$ 2,290,389
MH-191	Proyectado	1,200.00	282.76	278.53	\$ 4,039,766
MH-192	Proyectado	1,200.00	282.54	278.65	\$ 3,653,271
MH-193	Proyectado	1,200.00	282.71	278.41	\$ 4,124,609
MH-194	Proyectado	1,200.00	283.12	278.23	\$ 4,911,225
MH-195	Proyectado	1,200.00	283.53	278.00	\$ 5,909,068
MH-196	Proyectado	1,200.00	283.60	277.85	\$ 6,286,822
MH-197	Proyectado	1,200.00	283.69	277.75	\$ 6,627,370
MH-198	Proyectado	1,200.00	283.33	277.52	\$ 6,392,931
MH-199	Proyectado	1,200.00	283.26	277.33	\$ 6,609,116
MH-200	Proyectado	1,200.00	281.95	277.10	\$ 4,853,855
MH-203	Proyectado	1,200.00	283.25	280.13	\$ 2,934,935
MH-204	Proyectado	1,200.00	281.54	276.78	\$ 4,726,921
MH-205	Proyectado	1,200.00	281.50	276.59	\$ 4,940,131
MH-206	Proyectado	1,200.00	281.70	276.45	\$ 5,454,001
MH-207	Proyectado	1,200.00	281.44	276.25	\$ 5,360,232
MH-208	Proyectado	1,200.00	282.35	281.36	\$ 2,082,218
MH-209	Proyectado	1,200.00	282.35	281.13	\$ 2,094,043
MH-210	Proyectado	1,200.00	282.92	282.11	\$ 2,086,516

Cámara	Condición	Díámetro	Cota Rasante	Cota de Fondo	C _{cam}
		[mm]	[m.s.n.m.]	[m.s.n.m.]	[\$COP]
MH-213	Proyectado	1,200.00	282.54	281.47	\$ 2,084,127
MH-214	Proyectado	1,200.00	282.32	281.02	\$ 2,102,710
MH-215	Proyectado	1,200.00	282.39	281.00	\$ 2,115,271
MH-216	Proyectado	1,200.00	282.50	280.95	\$ 2,144,947
MH-217	Proyectado	1,200.00	282.50	280.91	\$ 2,153,835

*Costos proyectados en pesos colombianos al año 2023

Fuente: Elaboración propia

TUBERÍAS	\$ 4,760,036,519
POZOS	\$ 497,447,417
TANQUES	\$ 3,619,927,522
COSTOS DIRECTOS	\$ 8,877,411,458

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante la fase de recopilación de la información, se obtuvo la información de catastro, respecto a las redes del sistema de alcantarillado pluvial de la zona de estudio de la ciudad de San José de Cúcuta, con los cuales fue posible construir la topología y realizar el diagnóstico del sistema. La modelación del sistema se realizó teniendo en cuenta la hidrología de la cuenca del Río Pamplonita con la información de la estación Aeropuerto Camilo Daza, la cual se encuentra en cercanías a la cuenca de estudio y tiene un periodo de registro mayor a 30 años.

Teniendo en cuenta los anterior, el agua lluvia del noroccidente de la zona de estudio desde las inmediaciones del barrio Prados del Norte y Unicentro hasta llegar al canal Bogotá, es recolectado a través de tuberías en concreto de 24 y 33 pulgadas (in). El canal rectangular en concreto de 1.85 m de ancho por 1 m de alto, situado en la avenida 2 Norte, alimenta la tubería de 33 in.

El agua lluvia proveniente del barrio Gratamira, el barrio Zulima y el flujo que circula por la Av. Libertadores, es recolectado por tuberías de 0.61 m (36 in) y 0.84 (40 in) en concreto, instaladas al margen izquierdo de la avenida libertadores hasta la calle 18 Norte. El flujo de escorrentía que proviene del barrio Zulima por la calle 12 y 14 Norte, la urbanización La Mar y el parque Gratamira, es recolectado por sumideros instalados en las vías y transportado mediante canales cerrados rectangulares en concreto de 1,4 m de ancho y 0,6 m de alto hasta la intercesión de la avenida 15ª Este y la calle 14 Norte, donde es entregado a dos tuberías de 0.56 m (22 in) en policloruro de vinilo (PVC) hasta llegar a la Av. Libertadores.

En la calle 9ª Norte se encuentra un canal trapezoidal en concreto y piedra con un ancho promedio de 1,2 m y 1 m de alto, el cual recibe una parte del agua de lluvias proveniente del barrio Guaimaral, San Eduardo y los Acacios, transportándola hasta el rio pamplonita. De forma general, se pudo identificar que las tuberías están en PVC y concreto y los canales en concreto, para un total de 2.7 km de red y canales.

Los Sistemas Urbanos de drenaje sostenible (SUDS), Conforman un grupo de nuevas tecnologías que buscan adelantarse a la aparición de problemas de inundaciones para que sean mitigadas desde su origen mediante procesos de infiltración, almacenamiento y conducción. Esto disminuye los caudales picos generados por los procesos de urbanización tradicionales, que impermeabilizan la gran mayoría del área disponible y requieren estructuras de gran envergadura para su conducción mediante sistemas de alcantarillado.

En la determinación de las tipologías factibles para el área de estudio, se analizaron distintas variables para definir los espacios que se van a implementar con la tipología según las características del área disponible. Este proceso se llevó a cabo de acuerdo con las restricciones físicas, así como las asociadas a las actividades que puedan tener espacio. De acuerdo con la metodología proporcionada por la Universidad de los Andes, se enumeran las calificaciones asignadas a las tipologías,

con cinco criterios (Mejoramiento de la calidad del agua, manejo de volúmenes, amenidad y conflictos de uso, mantenimiento y costos) donde se evaluaron diferentes características, desde el punto de vista de su desempeño y operación. Una vez realizada la evaluación para cada tipología, la más adecuada de acuerdo con las condiciones propias del caso de estudio son los tanques de almacenamiento, los cuales tienen como función principal la retención del volumen de escorrentía generado en un evento de lluvia.

Los tanques de almacenamiento son estructuras rígidas en forma de prisma que tienen como función principal la retención del volumen de escorrentía generado en un evento de lluvia. Estas estructuras pueden diseñarse de múltiples maneras y ubicarse de manera superficial o subterránea. Los tanques de tormenta, una solución de drenaje urbano sostenible, recolectan, infiltran, almacenan y reutilizan el agua de lluvia. Permiten la conservación y/o reutilización del agua de las calzadas o áreas duras. En periodos de sequía, las aguas que se mantienen en nuestros tanques pueden ser reutilizadas y mitigan los efectos negativos de eventos climáticos como lluvias torrenciales.

En el presente estudio se descubrió que los sistemas de alcantarillado convencionales no responden a las demandas urbanísticas de las ciudades, debido a que resultan diámetros muy grandes al llegar a los sitios de descarga, lo que lleva a la búsqueda de nuevas alternativas que solucionen la problemática de las inundaciones. Los SUDS son una herramienta efectiva que brinda una solución duradera. La implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en una ciudad es una excelente propuesta para solucionar la problemática de las inundaciones, todo teniendo en cuenta los tiempos de recuperación de estas estructuras.

En primera instancia, se realizó la optimización de la red existente, el trazado de las redes de alcantarillado pluvial se realizó con el fin de garantizar la recolección de todas las aguas lluvias de una manera eficaz, teniendo a favor las pendientes de las vías del municipio, además de no sobrecargar las redes. Buscando mantener el trazado que existe actualmente, sin embargo, independizándolo de la red sanitaria. A partir de las redes proyectadas, se pudo evidenciar que los diámetros en las descargas y a lo largo de grandes tramos superan las 36" de diámetro, lo que implicaría realizar estructuras de conexión especiales para cada caso.

Una vez implementados los tanques de tormenta en el sistema de alcantarillado pluvial, se ajustó también la topología de la red, disminuyendo los diámetros considerablemente respecto a lo que se proponía con la optimización del sistema, esto debido a la atenuación de los caudales pico. Por lo tanto, los costos disminuyen también considerablemente debido a esta reducción de los diámetros propuestos.

En la ciudad de San José de Cúcuta, no existen aún políticas claras que dicten normas y determinen un plan claro que incentive a la implementación de este tipo de tecnologías alternativas. El desarrollo de este estudio confirmó que la

implementación de tipologías SUDS no requiere grandes superficies porque pueden instalarse en forma de trenes o por secciones, mejorando la calidad de las aguas escurrientías urbanas, apoyando los procesos naturales de depuración y evitando que las cargas contaminantes lleguen a los cuerpos hídricos que son utilizados para el consumo.

Con base en este estudio, se recomienda para estudios posteriores la implementación de otro tipo de sistemas urbanos de drenaje, diferente a los tanques de tormenta, esto con el fin de revisar el comportamiento de la atenuación de caudales pico y los tiempos de recuperación de otro tipo de estructuras en el sistema de alcantarillado pluvial.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía San José de Cúcuta. (2020). *Plan de Desarrollo Municipal*. https://www.asocapitales.co/nueva/wp-content/uploads/2020/11/Cucuta_Plan-de-Desarrollo-Municipal_2020-2023.pdf
- Butler, D., Digman, C., Makropoulos, C., & Davies, J. (2018). *Urban Drainage Fourth Edition*.
- Castro Fresno, D., Rodríguez Bayón, J., Rodríguez Hernández, J., Ballester Muñoz, F., & Rodríguez Hernández Francisco Ballester Muñoz, J. (2005). *SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)* (Vol. 30). <https://www.redalyc.org/pdf/339/33910403.pdf>
- Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental CIIA, & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2016). *Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*.
- Colombia. Ministerio de Ambiente, V. y D. Territorial. (2010). *Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Computational Hydraulics International (CHI). (2023). *SOPORTE PCSWMM*. Controles LID. <https://support.chiwater.com/79170/lid-placement>
- Cubides, E. D., & Santos, G. E. (2018). Control de escorrentías urbanas mediante Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS): Pozos/Zanjas de infiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 12(24), 32. <https://doi.org/10.31908/19098367.3813>
- Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas – DICTUC, & Ministerio de vivienda y urbanismo-(MINVU). (1996). *Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos. Guía de diseño*.
- Dziopak Józef. (2018). *Un canal de retención de aguas residuales como red de saneamiento y depósito de acumulación*. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/20/e3sconf_infraeko2018_00016/e3sconf_infraeko2018_00016.html
- Epa, U., & of Wetlands, O. (2012). *Terminology of Low Impact Development*. www.epa.gov/smartgrowth.
- Florez Luisa. (2018). *TIPOLOGÍA DEL SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) CON MEJOR ADAPTACIÓN A LAS CONDICIONES DE LA UNIVERSIDAD EL BOSQUE Y SU RELACIÓN HACIA LA PREVENCIÓN DE INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO SALITRE*.

Gómez Páez, S., Carlos, J., Rojas, C., & Páez, G. (n.d.). *Consecuencias del crecimiento demográfico sobre la calidad de la vida en la ciudad de Bogotá, periodo 1985 - 2015*.
<https://ciencia.lasalle.edu.co/economia><https://ciencia.lasalle.edu.co/economia/289>

GÓMEZ VALENZUELA CHRISTIAN MATEO, & SANGUINO LÓPEZ SERGIO ANDRÉS. (2019). ANÁLISIS BENEFICIO COSTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLES (SUDS) EN CUENCAS URBANAS DE USO RESIDENCIAL EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ. *ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO*.

Hernández Rodríguez John Wilson. (2020). Propuesta de implantación de sistemas alternativos de drenaje pluvial urbano en el proyecto vial avenida Tintal de Bogotá D.C. *Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*.
<https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1248>

IDEAM. (2023). *CURVAS INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA –IDF*.
<http://www.ideam.gov.co/curvas-idf>

IDEAM-Instituto de Hidrología, M. y E. A. (n.d.). *Amenazas Inundación*. Retrieved April 13, 2022, from <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>

MARTÍNEZ CANDELO GEINNER. (2013). *SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE “SUDS” COMO ALTERNATIVA DE CONTROL Y REGULACIÓN DE LAS AGUAS LLUVIAS EN GEINNER MARTÍNEZ CANDELO UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL*.

Ministerio de Vivienda, C. y T. (2021). *Resolución 0799 de 2021*.
www.minvivienda.gov.co

MUÑOZ RODRIGUEZ JUAN PABLO, & ACUÑA ZAIDA ESPERANZA. (2015). *SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE “SUDS” COMO ALTERNATIVA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE INUNDACIONES EN NECHÍ UN MUNICIPIO DE LA MOJANA*. *Universidad Católica de Colombia*.
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2394/3/ARTICULO.pdf>

Naciones Unidas. (2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

Ngamaliou-Nengoue, U. A., Iglesias-Rey, P. L., & Martínez-Solano, F. J. (2019). Urban drainage networks rehabilitation using multi-objective model and search space reduction methodology. *Infrastructures*, 4(2).
<https://doi.org/10.3390/infrastructures4020035>

- PERALES MOMPALER, S., ANDRÉS DOMÉNECH, I., & FERNÁNDEZ ESCALANTE, A. E. (n.d.). *LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) EN LA HIDROGEOLOGÍA URBANA*.
- Sánchez Tapiero Diego Iván. (2021). *CUANTIFICACIÓN DE LA PELIGROSIDAD EN PEATONES POR INUNDACIONES DE ORIGEN PLUVIAL EN CUENCAS URBANAS USANDO LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON Y EL MODELO DE GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES (SWMM)*.
- Sánchez Tapiero Diego Iván. (2023). *Cuantificación de la Peligrosidad en Peatones por Inundaciones de Origen Pluvial en Cuencas Urbanas Usando Lenguaje de Programación Python y el Modelo Avanzado de Gestión de Aguas Pluviales (PCSWMM)*.
- Stehli, P. T., Weber, J. F., & Redin Vestena, L. (2021). *APLICACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UNA INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS TREX Y SWMM PARA LA SIMULACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA DISTRIBUIDA EN UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA* (Vol. 27). <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8201873.pdf>
- Universidad de los Andes, & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). (2017). *Producto 3: Guía técnica de diseño y construcción de SUDS*.
- Vargas, R., & Diaz-Granados, M. (1998). *CURVAS SINTÉTICAS REGIONALIZADAS DE INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA PARA COLOMBIA*. Universidad de Los Andes.