

DISEÑO DE UN SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) PARA
MANEJO DE ESCORRENTÍA EN LA CARRERA 9 ENTRE CALLES 108 Y 112,
SECTOR USAQUÉN, BOGOTÁ, COLOMBIA.

HOLLMAN YECID CANO SALAZAR

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C

2021

PREDISEÑO DE UN SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) PARA
MANEJO DE ESCORRENTÍA EN LA CARRERA 9 ENTRE CALLES 108 Y 112,
SECTOR USAQUÉN, BOGOTÁ, COLOMBIA.

HOLLMAN YECID CANO SALAZAR

Proyecto de grado para optar el título de
Ingeniero Civil

Director
Antonio Preziosi Ribero

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C

2021

Nota de aceptación

Jurado

Jurado

Bogotá D.C, septiembre de 2021.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. GENERALIDADES DEL TRABAJO	2
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
2.2 OBJETIVOS	3
2.2.1 Objetivo general	3
2.2.2 Objetivos específicos	3
2.3 JUSTIFICACIÓN	4
2.4 ALCANCE	5
3. MARCOS DE REFERENCIA	5
3.1 MARCO CONCEPTUAL	5
3.2 MARCO TEÓRICO	6
3.2.1 El ciclo hidrológico	6
3.2.3 Tipologías estructurales para los sistemas de drenaje urbano sostenible	9
3.3 MARCO NORMATIVO Y LEGAL	13
3.4 MARCO GEOGRÁFICO	17
3.5 ESTADO DEL ARTE	18
4. METODOLOGÍA	21
4.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO	21
5. METAS ESTRATÉGICAS PARA LA GESTIÓN DE LAS AGUAS LLUVIAS	23
5.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO	23
5.1.1 Revisión a planes locales	24
5.1.2 Usos del suelo	25
5.1.3 Stakeholders	26
5.2 OBJETIVOS ESTRATÉGICOS PARA LA GESTIÓN DE LAS AGUAS LLUVIAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	26
5.2.1 Situación del lugar respecto al parámetro “Cantidad de agua”	27
5.2.2 Situación del lugar respecto al parámetro “Calidad de agua”	27
5.2.3 Situación del lugar respecto al parámetro “Amenidad”	27
5.2.4 Situación del lugar respecto al parámetro “Biodiversidad”	27
6. DISEÑO CONCEPTUAL	28
6.1 CARACTERIZACIÓN DEL SITIO	28
6.1.1 Topografía	28
6.1.2 Rutas de flujo y puntos de descarga	29
6.1.3 Potencial de infiltración	30

6.1.4 Infraestructura existente	32
6.1.5 Suelos y geotecnia	33
6.2 SELECCIÓN DE TIPOLOGÍAS SUDS PARA EL PREDISEÑO	34
6.2.1 Preselección de tipologías de acuerdo a áreas potenciales.....	34
6.2.2 Preselección de tipologías de acuerdo a características del sitio	35
6.2.3 Preselección de tipologías de acuerdo a mejora en la calidad del agua	36
6.2.4 Preselección de tipologías de acuerdo a control de volumen de aguas lluvias.....	38
6.2.5 Preselección de tipologías de acuerdo a amenidad y conflictos de uso	38
6.2.6 Preselección de tipologías de acuerdo a mantenimiento	39
6.2.7 Preselección de tipologías de acuerdo a los costos	40
6.3 EVALUACIÓN PONDERADA DE LAS TIPOLOGÍAS SUDS.....	40
6.3.1 Evaluación ponderadas de tipologías preseleccionadas	40
6.3.2 Diseño conceptual	41
7. DISEÑO DE TIPOLOGÍAS SELECCIONADAS	43
7.1 DISEÑO HIDROLÓGICO	43
7.1.1 Curvas intensidad duración frecuencia (IDF).....	44
7.1.2 Hietogramas de precipitación	45
7.2.1 Áreas de drenaje para trenes en zanja de infiltración	45
7.2.2 Coeficientes de escorrentía para áreas de drenaje en zanjas de infiltración	47
7.2.3 Caudal de diseño para zanja filtrante (Q_r).....	48
7.2.4 Dimensionamiento de zanjas de infiltración	49
7.3 DISEÑO DE TANQUES DE ATENUACIÓN.....	52
7.3.1 Áreas de drenaje para tanques de atenuación	52
7.3.2 Coeficientes de escorrentía para tanques de atenuación.....	52
7.3.3 Dimensionamiento tanque de almacenamiento	53
7.4 DISEÑO DE PAVIMENTO PERMEABLE	58
7.4.1 Áreas de drenaje para pavimentos permeables.....	58
7.4.2 Coeficientes de escorrentía para pavimentos permeables	59
7.4.3 Volumen de calidad (V_c) para pavimentos permeables	60
7.4.4 Dimensionamiento de pavimentos permeables.....	60
7.5 DISEÑO DE ZONAS DE BIORETENCIÓN	64
7.5.1 Área de drenaje para primera zona de bioretención	64
7.5.2 Coeficientes de escorrentía para áreas de drenaje en segunda zona de bioretención .	66
7.5.3. Volumen de calidad (V_c) para zonas de bioretención	67
7.5.4 Dimensionamiento de las zonas de bioretención	68

8. MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA	75
8.1 SIMULACIÓN DE PRECIPITACIÓN	75
8.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	77
8.2.1 Capacidad de colectores	78
8.2.3 Velocidad de flujo	79
8.2.4 Inundación	80
8.2.5 Caudales de escorrentía	80
8.2.6 Perfiles	81
8.4 MODELACIÓN DE SUDS	83
8.5 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN	84
9. CONCLUSIONES	94
10.BIBLIOGRAFIA	98
11. ANEXOS	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.Marco conceptual sistema de drenaje convencional y SUDS	5
Figura 2.Ciclo hidrológico	6
Figura 3.Impactos de la urbanización en los caudales de escorrentía.	7
Figura 4.Principios de la filosofía SUDS	8
Figura 5.Zona de bioretención en Leominster, MA	10
Figura 6.Sección transversal zanja de infiltración.	11
Figura 7.Estructura típica de pavimento permeable con infiltración parcial	12
Figura 8.Esquema tanque de almacenamiento de aguas lluvias.	13
Figura 9.Ubicación geográfica de la UGA 043	17
Figura 10. Plaza de Benthemplein inundada después de un evento	19
Figura 11. Funcionamiento humedal artificial en Tanner Spring Park.....	20
Figura 12.Usos del suelo en el área del proyecto.....	25
Figura 13. Mapa pendiente del terreno en áreas potenciales para implementación de SUDS.	28
Figura 14. Curvas de nivel en el área de afectación	29
Figura 15.Rutas de flujo de la escorrentía con puntos de descarga en la UGA 043 y área de diseño..	30
Figura 16. Mapa distancia a nivel freático en áreas potenciales para implementación de SUDS.	31
Figura 17.Mapa de tasas de infiltración en áreas potenciales para implementación de SUDS.....	32
Figura 18. Red de alcantarillado pluvial existente en el área de diseño	32
Figura 19. Mapa zonificación geotécnica en el área de diseño para identificar suelo presente.	33
Figura 20.Perfil de los suelos existentes entre los Cerros Orientales y la Carrera 15 Sector Santa Ana próximo al área de diseño	34
Figura 21. Diseño conceptual con tipologías seleccionadas	42
Figura 22.Curvas IDF para área de estudio	44
Figura 23.Mapa áreas de drenaje para zona potencial del primer tren en zanja filtrante que conecta con primer tanque de atenuación para aguas lluvias.	46
Figura 24.Mapa áreas de drenaje para zona potencial del segundo tren en zanja filtrante que conecta con segundo tanque de atenuación	47

Figura 25.Plano corte sección transversal en la primera zanja filtrante.....	51
Figura 26.Caja de inspección en zanja filtrante que conecta la tipología con el tanque de atenuación.	52
Figura 27.Balance de masas en primer tanque de atenuación propuesto	56
Figura 28.Corte de sección para primer tanque de atenuación.....	57
Figura 29.Mapa áreas de drenaje para zona potencial de pavimento permeable.....	59
Figura 30.Corte de sección en estructura de pavimento permeable	63
Figura 31.Vista en planta sección de pavimento permeable diseñada.....	64
Figura 32.Mapa áreas de drenaje para zona potencial de primer tren en zona de bioretención.....	65
Figura 33.Mapa áreas de drenaje para zona potencial de segundo tren en zona de bioretención	66
Figura 34.Corte sección transversal en zona de bioretención de 1.20 x 2.20 m.....	73
Figura 35.Corte sección longitudinal para zona de bioretención de 1.20 x 2.20 m	73
Figura 36.Vista en planta para zona de bioretención de 1.20 x 2.20 m	74
Figura 37.Red de alcantarillado pluvial en la UGA 043, en amarillo la zona modelada en EPA SWMM.....	76
Figura 38.Hietograma de intensidades para un periodo de retorno de 3 años utilizado en la serie temporal	77
Figura 39.Hietograma de intensidades para un periodo de retorno de 25 años utilizado en la serie temporal	77
Figura 40.Capacidad de colectores en el área simulada para un periodo de retorno de 3 años	78
Figura 41.Velocidad de flujo en colectores en el área simulada para un periodo de retorno de 3 años	79
Figura 42.Caudal de rebose que se presenta en el pozo N4 para un periodo de retorno de 3 años	80
Figura 43.Comparación caudal de escorrentia entre áreas duras y vegetadas que se encuentran en Carrera 9 entre Calles 110 – 112.....	81
Figura 44.Perfil de alcantarillado pluvial que corresponde al tramo Carrera 9 entre Calles 110 - 112.	82
Figura 45.Perfil de alcantarillado pluvial que corresponde al tramo Carrera 9 entre Calles 108 – 110	82
Figura 46.Perfil de alcantarillado pluvial que corresponde a la Calle 110 entre Carrera 7y Carrera 9	83
Figura 47.Modelo conceptual Low Impact Development en SWMM 5.1	84
Figura 48.Comparación caudal de salida subcuencas condiciones actuales y aplicando pavimentos permeables junto con zonas de bioretención para un periodo de retorno de 3 años.	85
Figura 49.Comparación caudal de salida subcuencas condiciones actuales y aplicando tipologías pavimentos permeables junto con zonas de bioretención para un periodo de retorno de 25 años.	85
Figura 50.Comparación caudal de salida en subcuencas condiciones actuales y aplicando pavimentos permeables en un periodo de retorno de 3 años.	86
Figura 51.Comparación caudal de salida en subcuencas condiciones actuales y aplicando pavimentos permeables para un periodo de retorno de 25 años.	87
Figura 52.Comparación caudal de salida en subcuencas condiciones actuales y aplicando zonas de bioretención en un periodo de retorno de 3 años.	88
Figura 53.Comparación caudal de salida en subcuencas condiciones actuales y aplicando zonas de bioretención con modificaciones en un periodo de retorno de 3 años.	89
Figura 54.Comparación caudal de salida en subcuencas condiciones actuales y aplicando zonas de bioretención con modificaciones en un periodo de retorno de 25 años.	90
Figura 55.Comparación caudal de salida en subcuencas condiciones actuales y aplicando tanques de atenuación	91
Figura 56.Comparación caudal de salida en área de estudio en condiciones actuales y aplicando todas las tipologías SUDS diseñadas en un periodo de retorno de 3 años.....	92

Figura 57.Comparación capacidad y rebose en el colector L4 y pozo N4 aplicando SUDS vs condiciones actuales para un periodo de retorno de 3 años.	93
Figura 58.Comparación caudal de salida en área de estudio en condiciones actuales y aplicando todas las tipologías SUDS diseñadas en un periodo de retorno de 3 años.....	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Marco normativo y legal	17
Tabla 2.Metodología seguida en el trabajo para el diseño preliminar y evaluación de tipologías SUDS en el área de estudio.	23
Tabla 3.Preselección de tipologías SUDS con base a áreas potenciales del lugar	35
Tabla 4.Restricciones según características y parámetros del sitio.....	36
Tabla 5.Calificación de tipologías de acuerdo a eficiencia en remoción de contaminantes a la escorrentía	37
Tabla 6.Calificación de tipologías de acuerdo a eficiencia en control de escorrentia	38
Tabla 7.Calificación de tipologías de acuerdo a amenidad y conflictos de uso	39
Tabla 8.Calificación de tipologías de acuerdo a frecuencia en mantenimiento	39
Tabla 9.Calificación de tipologías según costos	40
Tabla 10.Evaluación final de tipologías	41
Tabla 11.Coeficientes para ecuación de curvas IDF de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá	43
Tabla 12. Áreas de aporte para zanja filtrante	46
Tabla 13.Coeficientes de escorrentía para áreas de aporte zanjias filtrantes	48
Tabla 14.Caudales de diseño para cada zanja filtrante	48
Tabla 15. Características y dimensiones propuestas para el primer dren filtrante.....	49
Tabla 16. Cálculo capacidad de flujo en zanja filtrante	50
Tabla 17. Comprobación capacidad drenante en tubería de drenaje seleccionada	50
Tabla 18. Coeficientes de escorrentia en áreas de aporte para un periodo de retorno de 25 años.....	53
Tabla 19. Características físicas de la UGA 043	54
Tabla 20. Cálculo de tiempo pico en tormenta.....	54
Tabla 21. Cálculo caudal pico en área de aporte para tanque de atenuación.....	55
Tabla 22. Dimensiones y características para primer tanque de atenuación.....	57
Tabla 23. Áreas de drenaje para pavimentos permeables.....	58
Tabla 24.Coeficientes de escorrentía para áreas de aporte a pavimento permeable	59
Tabla 25.Volúmenes de tratamiento para pavimento permeable.....	60
Tabla 26. Espesor en capa de rodadura y sub-base en asfaltos porosos para trafico categoría 2.....	61
Tabla 27. Áreas de drenaje y de pavimento permeable junto características de sub-base	62
Tabla 28. Cálculo volumen de reservorio o sub-base y altura en lámina de agua	62
Tabla 29.Áreas de aporte para primer tren de tratamiento con zonas de bioretención.....	65
Tabla 30. Áreas de aporte para segundo tren de tratamiento con zonas de bioretención.....	65
Tabla 31. Coeficientes de escorrentía para áreas de aporte a zonas de bioretención	66
Tabla 32.Volúmenes de tratamiento para primer tren con zonas de bioretención	67
Tabla 33.Volúmenes de tratamiento para segundo tren con zonas de bioretención	67
Tabla 34. Cálculo área mínima de fondo para zona de bioretención	68
Tabla 35. Cálculo volumen total que puede almacenar la zona de bioretención en su superficie.....	69
Tabla 36. Dimensiones de zonas de bioretención para primer tren	69

Tabla 37. Volúmenes de almacenamiento, infiltración y filtración en zonas de bioretención para primer tren.....	70
Tabla 38. Dimensiones de zonas de bioretención para segundo tren	70
Tabla 39. Volúmenes de almacenamiento, infiltración y filtración en zonas de bioretención para segundo tren.	71
Tabla 40. Comprobación del diseño a partir del tiempo de tratamiento en medio filtrante o sustrato.	72
Tabla 41. Modificaciones realizadas en las subcuencas con zonas de bioretención para mejorar la reducción de caudales pico	89

1. INTRODUCCIÓN

La creciente urbanización y el desarrollo que se presentan en la ciudad de Bogotá ha llevado a un reemplazo de la cobertura natural de los suelos por superficies impermeables con materiales que limitan procesos hidrológicos como la infiltración, intercepción y evapotranspiración de las aguas lluvias. Lo anterior, ocasiona problemas como aumento en los caudales y volúmenes de escorrentía, inundaciones, encharcamientos que provocan congestión vehicular, pérdidas humanas y económicas, arrastre de sedimentos o contaminantes a la red existente afectando la calidad de las aguas en los cuerpos receptores, como también una pérdida en el valor paisajístico de los espacios al ser transformados en áreas duras que no permiten la recreación, mejoras en la calidad del aire, y reducen igualmente áreas potenciales para la protección de especies animales y vegetales. Al mismo tiempo, los fenómenos invernales como también los efectos del cambio climático provocan precipitaciones de mayor intensidad en cortos periodos de tiempo, que junto a una red de alcantarillado pluvial con capacidad limitada y ante una reducida cobertura verde en los espacios públicos, no brindan la eficiente evacuación de las aguas lluvias, ocasionando los problemas ya mencionados.

Con el propósito de mejorar las condiciones del drenaje pluvial para reducir y mitigar las inundaciones y encharcamientos producto de la escorrentía, es necesario considerar la implementación de sistemas de drenaje urbano sostenible que se complementan a la red convencional. La filosofía de las tipologías SUDS contempla cuatro principios: Cantidad del agua, calidad del agua, amenidad y biodiversidad, estos presentan mejoras como la reducción en caudales de escorrentía, el almacenamiento y reutilización del recurso hídrico en distintas actividades, la recarga de aguas subterráneas, así mismo la disminución de contaminantes transportados por las aguas lluvias que colmatan las tuberías y disminuyen la calidad de los cuerpos receptores. Al mismo tiempo, aportan un mejoramiento del paisaje urbano para el disfrute de la población y conservación de los micro-ecosistemas locales. El desarrollo de una normativa local por parte de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), la elaboración de guías y manuales de diseño por parte del Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) de la Universidad de los Andes, han hecho posible el uso de estructuras de drenaje urbano sostenible en la ciudad de Bogotá aportando una posible solución para un manejo adecuado de las aguas lluvias, más sin embargo en algunas zonas de la ciudad los

problemas de inundación por fuertes precipitaciones persisten siendo necesario priorizar estas áreas.

2. GENERALIDADES DEL TRABAJO

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Frente a los desafíos que impone el cambio climático en la ciudad de Bogotá, uno de los más preocupantes es la capacidad de la infraestructura existente para mitigar los efectos de los fenómenos invernales. Uno de los puntos críticos en temporada de lluvias, se encuentra ubicado en el tramo de la Carrera 9 entre calles 108 y 112 en el sector de Usaquén cerca a la estación del tren turístico de la Sabana, el cual, ante fuertes aguaceros se ve afectado por altos volúmenes y caudales de escorrentía que perjudican la movilidad, afectan las construcciones existentes y el patrimonio histórico de la localidad.

El uso del suelo y la creciente urbanización en un área consolidada como la zona nororiental de Bogotá, favorece a que se presenten problemas en el drenaje integral de las aguas lluvias. Igualmente, las malas prácticas o conductas ciudadanas en el manejo y eliminación de basuras, residuos sólidos y contaminantes favorecen la obstrucción y colmatación en la red de alcantarillado pluvial, lo cual reduce la capacidad de los colectores y contamina los flujos subterráneos, como también cuerpos de agua donde depositan, en este caso el Canal del Río Molinos que desemboca posteriormente en el Humedal Córdoba. Por último, la capacidad limitada en la red de drenaje pluvial, favorece a que se presenten rebosamientos en el alcantarillado durante fenómenos invernales como La Niña.

El presente trabajo de grado tiene como fin elaborar un prediseño de las tipologías de drenaje urbano sostenible más idóneas para el sector de la Carrera 9 entre calles 108 y 112 en el sector de Usaquén, mediante la caracterización del sitio, la selección objetiva de las estructuras de drenaje sostenible que más se adapten a las condiciones, el tratamiento de datos y simulación de procesos hidrológicos e hidráulicos, y el dimensionamiento de las tipologías tomando como eje la normativa NS-166, guías técnicas y de diseño elaboradas por el CIIA y metodologías aplicadas en otros países, con el propósito de aportar una mejora en la gestión integral de las aguas lluvias y reducir las inundaciones y encharcamientos que se presentan en la zona.

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 Objetivo general

Diseñar estructuras complementarias al sistema de drenaje pluvial distrital aplicando tipologías SUDS en la Carrera 9 entre calle 108 y 112 del sector Usaquén, mediante el manejo de datos y simulación de procesos hidrológicos e hidráulicos, con el fin de mejorar la gestión integral de las aguas lluvias.

2.2.2 Objetivos específicos

- Establecer las metas estratégicas que se buscan cumplir con la aplicación de las tipologías SUDS teniendo en cuenta los principios de cantidad del agua, calidad del agua, amenidad y biodiversidad.
- Identificar las características e información relevante del sitio de estudio, con el propósito de determinar las posibles tipologías SUDS a aplicar y definir un diseño conceptual preliminar.
- Simular los procesos hidrológicos e hidráulicos de la cuenca de estudio y la red de colectores pluviales existente, mediante datos pluviométricos de estaciones cercanas del IDEAM o la empresa de acueductos y alcantarillado de Bogotá EAAB, con el objetivo de determinar la capacidad de las tuberías y los caudales de esorrentía.
- Dimensionar las tipologías determinadas en el diseño conceptual siguiendo las especificaciones técnicas de la norma NS -166, la guía técnica de diseño y construcción de SUDS de la Universidad de los Andes, y metodologías aplicadas en otros países.
- Comparar mediante un módulo LID en el software SWMM 5.1 los efectos y los aportes de las tipologías SUDS diseñadas para la zona de estudio.

2.3 JUSTIFICACIÓN

La utilización de materiales impermeables en las obras civiles como asfaltos, adoquines, baldosas y concretos que no permiten la reproducción de procesos naturales como la infiltración, interceptación y evapotranspiración, junto con el uso de áreas verdes limitadas y una red de drenaje pluvial con capacidad condicionada que no responde adecuadamente ante precipitaciones intensas producto del cambio climático, ocasionan emergencias por los altos volúmenes de agua estancada y caudales que al no ser drenados eficientemente fluyen libremente por andenes y calzadas arrastrando contaminantes y provocando caos vehicular. Es por ello, que es pertinente apostar por elementos complementarios al sistema de alcantarillado que contribuyan a dar continuidad al ciclo hidrológico, brinden a la población espacios amenos, que puedan disfrutar y aporten un valor ecológico, asimismo, brindar un tratamiento de las aguas lluvias y mitigar los caudales pico de escorrentía superficial.

La aplicación de tipologías de sistemas de drenaje urbano sostenible representa una alternativa que se ajusta a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para las ciudades, al mismo tiempo, son un modelo económico de aplicar, de bajo costo que requiere de menores inversiones comparado con otros métodos tradicionales. Adicional a ello, al utilizar materiales y recursos como geosintéticos, superficies permeables, y gradaciones de suelos que permiten la infiltración de las aguas lluvias, vegetación que favorece la interceptación, evapotranspiración y reducción de contaminantes, contribuyen a una gestión integral de la escorrentía que ayudan a simular las condiciones naturales del sitio y permiten la reproducción del ciclo hidrológico. Por otro lado, los SUDS aportan en la disminución de caudales picos, mitigan y previenen inundaciones o encharcamientos, pueden reducir la velocidad de la escorrentía generada por precipitaciones, como también proporcionan beneficios para los ciudadanos ya que permiten modificar los espacios urbanos haciéndolos más seguros, resilientes, y sostenibles para los ciudadanos.

A partir de literatura como The SUDS Manual de la Asociación de Información e Investigación de la Industria de la Construcción (CIRIA) en el Reino Unido, la investigación de tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C por parte de la Universidad de los Andes y la EAAB, la Norma Técnica de Servicios NS-166 y metodologías adaptadas de otros países,

se entregará una solución mediante el diseño de tipologías SUDS en la zona de estudio para mitigar los problemas en la gestión de las aguas lluvias.

2.4 ALCANCE

El alcance del trabajo está enfocado, en la selección y diseño preliminar de tipologías de drenaje urbano sostenible complementarias a la red de alcantarillado existente en la Carrera 9 entre calles 108 y 112 en la localidad de Usaquén, con el fin de brindar una solución sostenible y resiliente a los problemas de inundaciones y encharcamiento por precipitaciones en la zona de estudio, como también ofrecer una alternativa para una mejor gestión integral de las aguas lluvias sin modificar la red de alcantarillado pluvial existente en el área de estudio.

3. MARCOS DE REFERENCIA

3.1 MARCO CONCEPTUAL

En la Figura 1, se presenta un esquema conceptual que compara el drenaje convencional de las aguas lluvias con los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

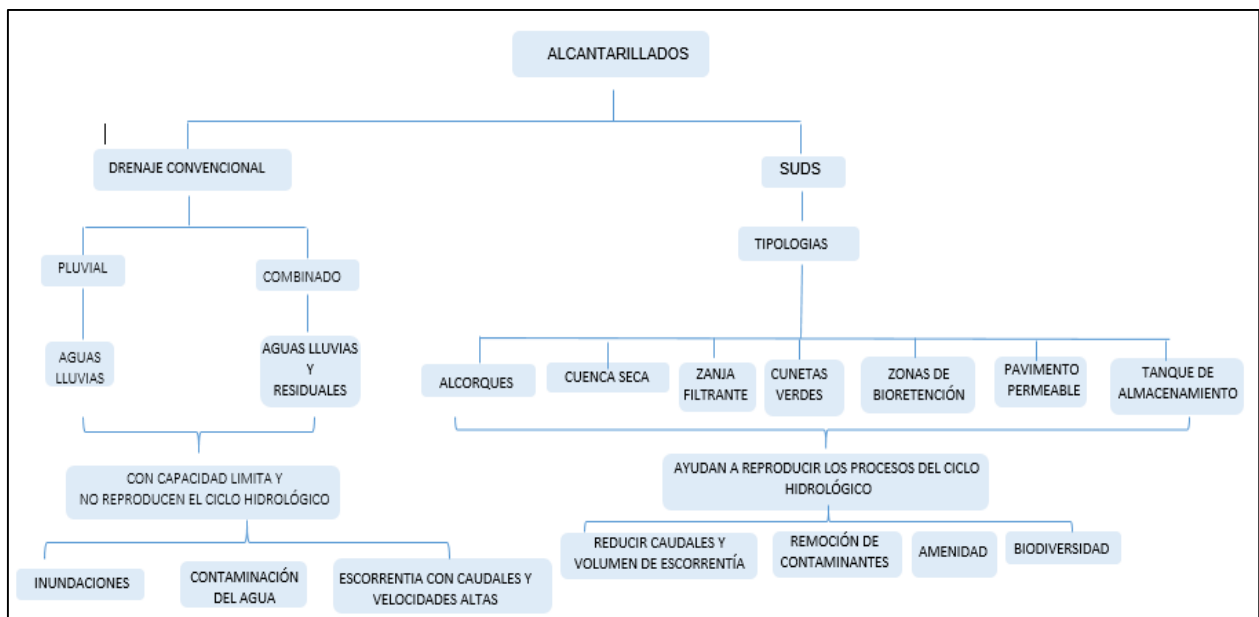


Figura 1. Marco conceptual sistema de drenaje convencional y SUDS

Fuente: propia

3.2 MARCO TEÓRICO

3.2.1 El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se considera como “el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido, gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.)” (Villón M, 2004, p.22). Es un proceso que no tiene un inicio y un fin definido donde el agua que se encuentra en ríos, mares, lagos y demás superficies es evaporada hacia la atmósfera, donde luego se condensa y cae en forma de lluvia, la cual es interceptada por la vegetación, infiltrada al suelo hacia los flujos subsuperficiales y transformada igualmente en escorrentía superficial. (Chow V et al, 1994, p.2). En la Figura 2, se muestran las etapas del ciclo hidrológico y los procesos por el cual el agua cambia de estado.

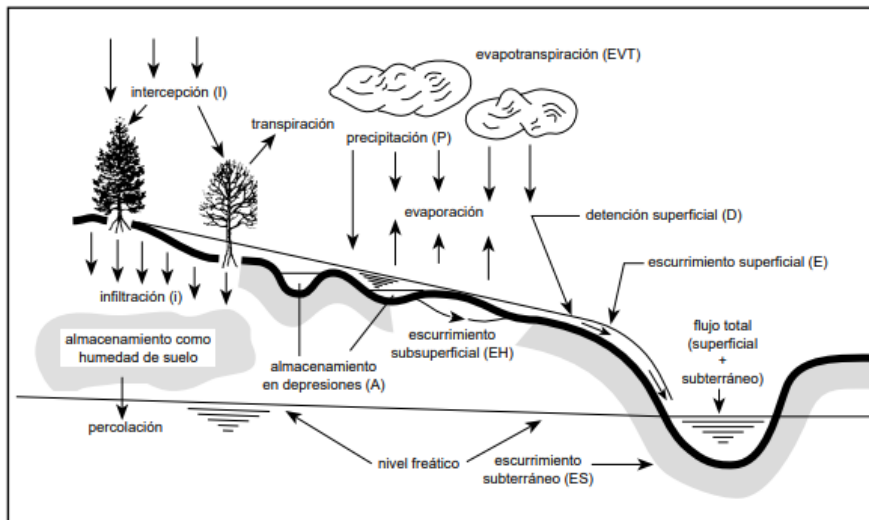


Figura 2. Ciclo hidrológico

Fuente: (Vich Alberto, 1996)

El aumento de la población urbana conlleva a la construcción de nueva infraestructura, lo cual implica la modificación de las superficies naturales por una impermeabilización de terrenos que restringe el ciclo del agua. De acuerdo a la Figura 3, estas transformaciones producen un aumento de los caudales picos de escorrentía y una disminución en el tiempo que se alcanza este valor máximo, al limitar procesos como la infiltración y evapotranspiración se reducen los flujos bases y sub superficiales, lo cual se traduce en una mayor cantidad de agua en superficie que representa una desventaja para los sistemas de drenaje convencionales.

En la gestión de las aguas lluvias, se ha optado tradicionalmente por evacuarlas lo más rápido y eficientemente posible a través de sistemas de drenajes subterráneos, con estructuras como sumideros y colectores de capacidad limitada que aumenta el riesgo de inundaciones y afecta la calidad de los cuerpos de agua. (Martinic, 2017, p.7).

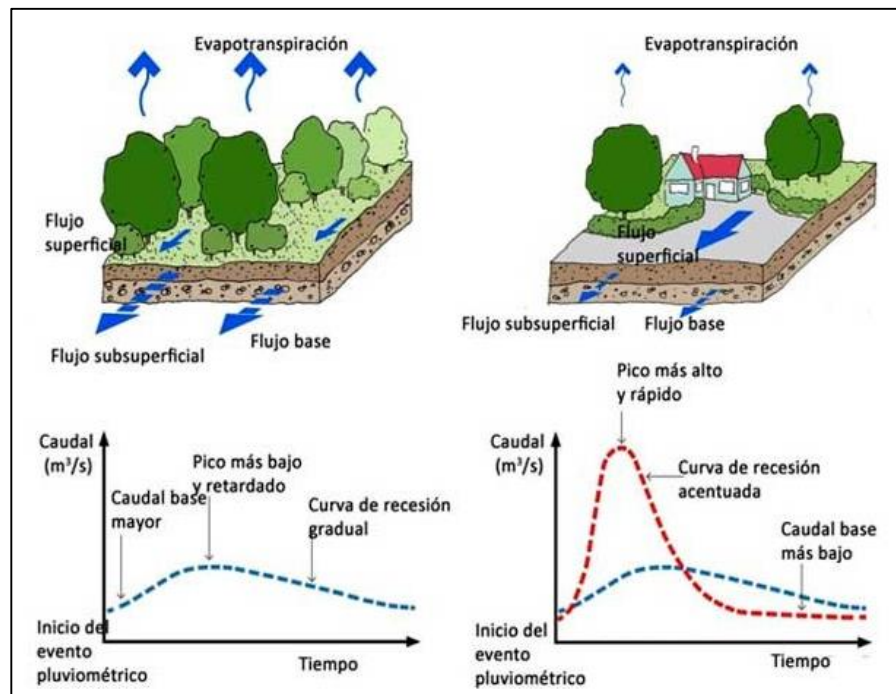


Figura 3. Impactos de la urbanización en los caudales de escorrentía.

Fuente: (iagua, 2016)

3.2.2 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

Los sistemas urbanos de drenaje sostenibles son elementos o estructuras complementarias al drenaje pluvial convencional de las ciudades que tienen como propósito realizar una gestión integral de las aguas lluvias reproduciendo el ciclo hidrológico natural en áreas que han sido impermeabilizadas por el crecimiento urbano. Es por ello que se puede relacionar con una alternativa sustentable y de bajo impacto que contribuye a cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible.

Los SUDS se pueden categorizar en dos grupos: estructurales y no estructurales, el primero de estos hace referencia a las tipologías y estructuras que se construyen para permitir procesos de infiltración, evapotranspiración, reducción de caudales y volumen de escorrentía, entre estas estructuras se pueden encontrar alcorques, pavimentos permeables, zonas de

bioretención, canales verdes etc. Mientras los no estructurales según Restrepo et al. (2007) “son una variedad de prácticas institucionales y educativas llamadas comúnmente control de fuente o prevención de contaminantes los cuales buscan reducir o eliminar el ingreso de contaminantes a las aguas lluvias” (p.71), con esto se hace referencia a prácticas ciudadanas que disminuyen la cantidad de contaminantes como sedimentos, grasas, químicos en las aguas de escorrentía, acciones como barrer la calle o los andenes, disponer de canecas o puntos ecológicos para basuras, como también el mantenimiento a la red de colectores se catalogan como medidas no estructurales que contribuyen a una gestión integral y sostenible de las aguas lluvias.

Para entender los beneficios de las tipologías de los sistemas urbanos de drenaje sostenible es necesario conocer los cuatro factores que se buscan satisfacer con el diseño y construcción de las estructuras: cantidad del agua, calidad del agua, amenidad y biodiversidad, los cuales se resumen en la Figura 4.

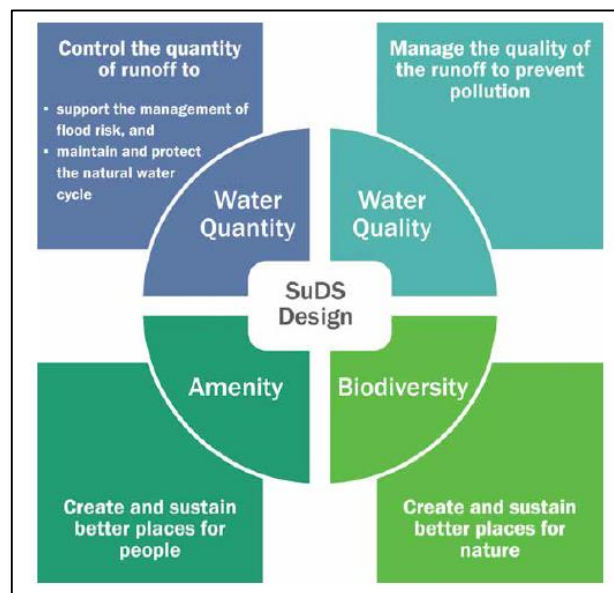


Figura 4. Principios de la filosofía SuDS

Fuente: (Ballard et al, 2015)

En la esquina superior izquierda de la Figura 4, se puede observar el factor cantidad de agua, los sistemas urbanos de drenaje sostenibles “son efectivos para reducir los riesgos de inundación en eventos de alta, corta y media duración” (Ballard et al, 2015), colaboran igualmente a reducir los picos y volumen de escorrentía, permiten el aprovechamiento del recurso hídrico que puede ser recolectado, almacenado y posteriormente reutilizado en actividades como el riego de jardines y descarga de sanitarios, como también se promueve la

infiltración a aguas subterráneas. En cuanto al parámetro Calidad del agua es posible interceptar y reducir contaminantes como sedimentos, nutrientes, grasas, aceites y metales pesados que son arrastrados por la escorrentía. Por último, respecto a los factores Amenidad y Biodiversidad se busca modificar los espacios urbanos y brindar a los habitantes paisajes agradables, multifuncionales, recreativos y zonas para disfrutar, al mismo tiempo, promover la conservación de ecosistemas y protección de las especies de fauna y flora locales

3.2.3 Tipologías estructurales para los sistemas de drenaje urbano sostenible

En la implementación de elementos no convencionales que participen en la gestión de las aguas lluvias, se pueden encontrar diversas tipologías de SUDS que se pueden aplicar dependiendo del beneficio que se espera obtener. A continuación, se muestra una recopilación de las estructuras que fueron útiles para complementar con el drenaje convencional en el área de estudio.

3.2.3.1 Zonas de bioretención

También denominados jardines de lluvia, su función es dirigir la escorrentía superficial a una depresión en el terreno ajardinado de poca profundidad que incorpora mecanismos para la reducción de contaminantes (Virginia DCR Stormwater, 2013). Su estructura está compuesta por un sustrato permeable compuesto por arena, limo y arcilla que permita la infiltración y el tratamiento de la escorrentía filtrando las aguas lluvias. Puede contener una capa de agregado grueso, con una tubería perforada en el fondo de la estructura cuando el terreno presente una capacidad de infiltración media o baja y se requiera transportar el excedente de las aguas de nuevo a la red de alcantarillado pluvial, permiten la gestión de las aguas lluvias para eventos de corta y larga duración en cortos períodos de retorno, facilita la remoción y disminución de contaminantes como fósforo, nitrógeno y sedimentos, modifican los espacios transformándolos en zonas verdes con amplia vegetación y presencia estética de cuerpos de agua, al mismo tiempo que promueven un entorno ecológico que puede albergar especies de anfibios, aves e insectos. En la Figura 5, se muestra una zona de bioretención donde se evidencia la vegetación en su superficie la cual se recomienda sea abundante para una mejor remoción de contaminantes, como también se puede observar un enrocado en su estructura de entrada para disipar la energía y evitar la erosión.



Figura 5. Zona de bioretención en Leominster, MA

Fuente: (MA Watershed Coalition, sf)

3.2.3.2 Zanja filtrante

Comúnmente conocido como dren francés es usualmente utilizado en el drenaje de vías. Esta tipología consiste en una trinchera llena de agregado junto con una tubería perforada para los caudales de excesos, permite la infiltración, filtración de partículas gruesas y almacenamiento de las aguas lluvias. Si bien posibilita la reducción de caudales picos su operación es limitada por la obstrucción que provocan los sedimentos por tal razón es necesario un mantenimiento más frecuente, tampoco hace un aporte significativo al mejoramiento del paisaje y la biodiversidad de las zonas donde se utiliza. En la Figura 6, se muestra un corte transversal de una zanja filtrante donde se puede observar el reservorio compuesto por agregado grueso, en caso de poder asegurar una infiltración completa se emplea geotextil en la parte inferior de la estructura, de lo contrario cuando la permeabilidad del terreno no favorece este proceso se recomienda una geomembrana y ubicar la tubería en el fondo.

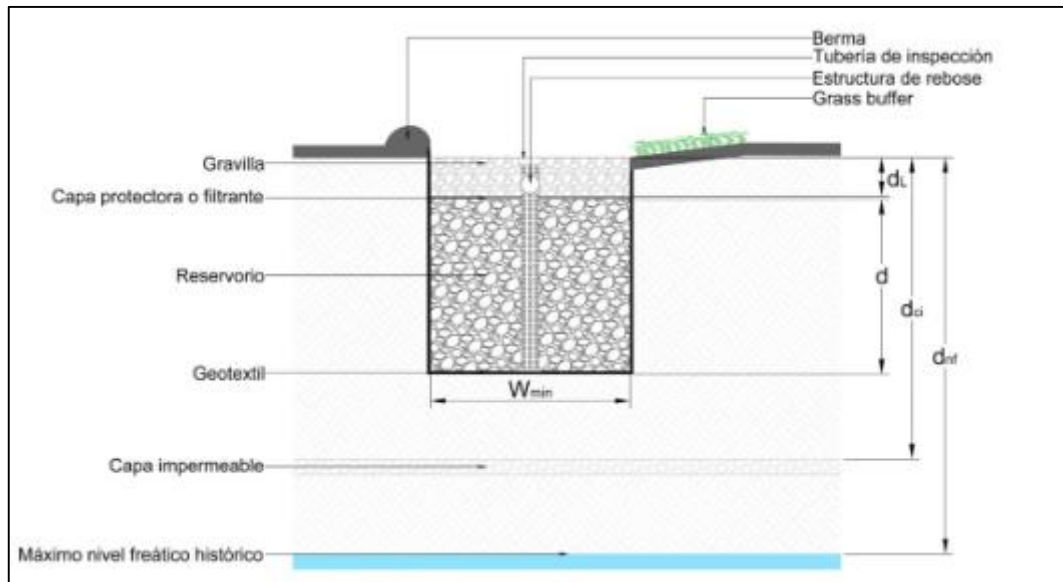


Figura 6. Sección transversal zanja de infiltración.

Fuente: (CIIA & Universidad de los Andes, 2017)

3.2.3.3 Pavimentos permeables

A diferencia de las estructuras de pavimento convencionales que están conformadas con una capa de rodadura impermeable, los pavimentos permeables están compuestos por una superficie que permita el paso del agua y al mismo tiempo que puedan resistir las cargas impuestas por vehículos pesados, livianos, ciclistas, transeúntes etc. Se consideran como “una cadena completa de drenaje dado que actúan como sistemas de captación, conducción, infiltración y almacenamiento, facilitando el control de la escorrentía” (Jato-Espino et al, 2019, p.3).

Entre los tipos de rodadura se pueden encontrar hormigón poroso, mezcla bituminosa porosa, adoquines con ranuras abiertas y césped o grava reforzada en los cuales los 2 últimos son bastante útiles para asegurar infiltración y almacenamiento, mientras los dos primeros brindan un drenaje diferido y depósito. (Rodríguez, 2008, p.38). La Figura 7, muestra una estructura típica para un pavimento permeable con infiltración parcial donde se observa una sub-base permeable con un espesor que se determina en el diseño hidráulico, una tubería perforada en el fondo acompañada por un geotextil para transportar las aguas lluvias que no se infiltran a la red de alcantarillado

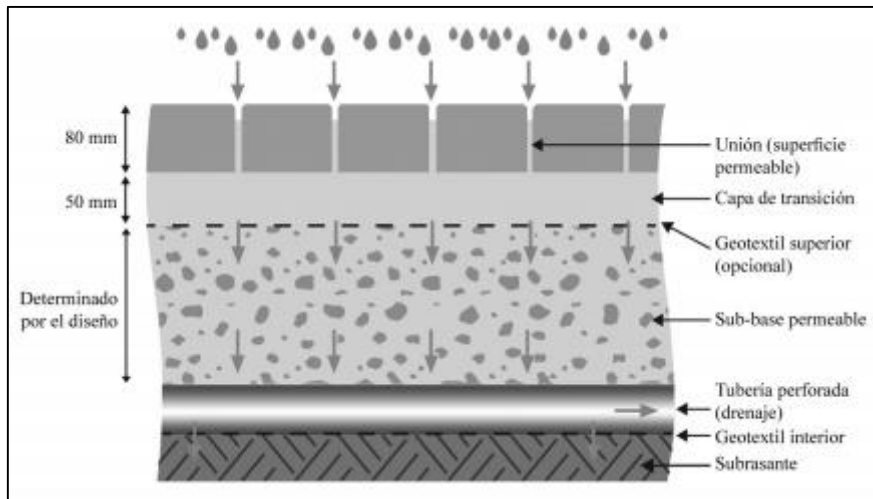


Figura 7. Estructura típica de pavimento permeable con infiltración parcial

Fuente: (Castro, adaptado de Interpave, 2008)

3.2.3.4 Tanques de almacenamiento

Su función es recolectar las aguas lluvias de superficies impermeables para su posterior almacenamiento, descarga controlada, infiltración o uso en actividades como riego de jardines, descarga de sanitarios o lavado de ropa. (Arciniegas, 2020). Estos tanques por lo general van enterrados y su material puede ser variado, desde geoceldas, estructuras plásticas o de concreto, no aportan un valor estético o biodiverso para los espacios más sin embargo son útiles para dar intercepción a eventos de precipitación, son una alternativa sostenible que permite ahorrar consumos de agua potable en las edificaciones. En la Figura 8, se representa un tanque de almacenamiento y aprovechamiento de las aguas lluvias, este contiene una bomba sumergible para la distribución del agua reservada.

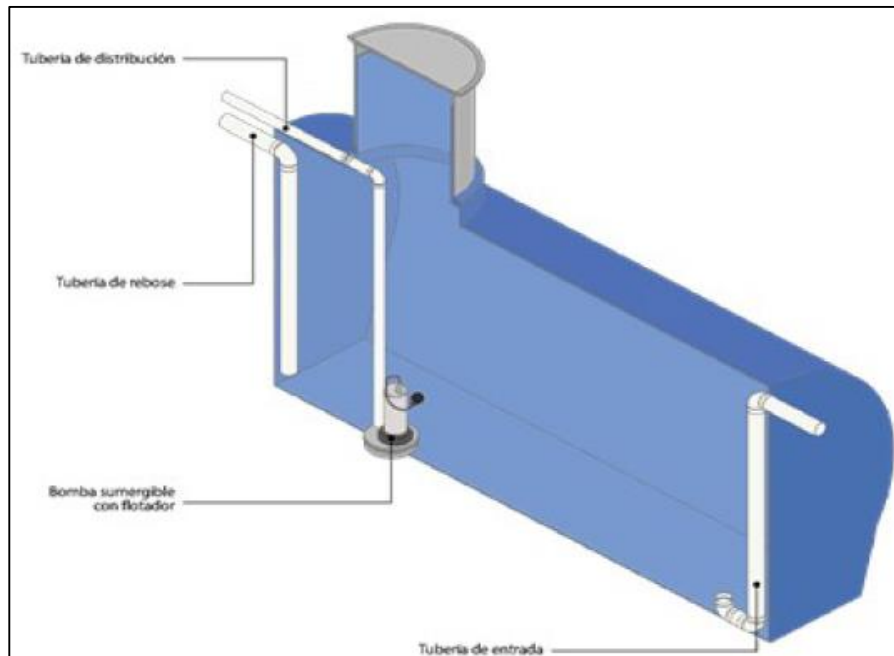


Figura 8. Esquema tanque de almacenamiento de aguas lluvias.

Fuente: (Norma Técnica de Servicio NS-166, 2018)

3.3 MARCO NORMATIVO Y LEGAL

Respecto al marco jurídico para la aplicación, diseño y construcción de sistemas de drenaje urbanos sostenibles en Colombia, se ha evidenciado un avance progresivo en los últimos años por parte de la Alcaldía de Bogotá, la empresa de acueducto y alcantarillado EAAB y cooperaciones entre esta última e instituciones como la Universidad de Los Andes que han colaborado por medio de investigaciones para la elaboración de una guía técnica de diseño. En la Tabla 1, se muestra una recopilación de los decretos, acuerdos distritales, resoluciones y normas que tienen relevancia en la aplicación de sistemas de drenaje urbano sostenible en la capital y a nivel nacional:

LEGISLACIÓN VIGENTE A NIVEL NACIONAL	
NORMATIVIDAD	DESCRIPCIÓN
Artículo 79 de la Constitución Política de Colombia	“Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la

	<p>participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectar. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”</p>
<p>Artículo 80 de la Constitución Política de Colombia</p>	<p>“El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas”</p>
<p>Resolución 033 de 2017 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio</p>	<p>Por medio de esta se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, en el cual resalta el Artículo 153 el cual 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 la impermeabilización de las áreas en el aumento de los caudales de escorrentía Se requiere diseñar sistemas urbanos de drenaje sostenible, con el objeto de reducir mínimo en un 25 el caudal pico del hidrograma de creciento de diseño, a fin de evitar sobrecargas de los sistemas pluviales y posteriores de inundación, para ello, adicionalmente, se debe hacer un análisis de las condiciones de escorrentía antes y después del proyecto versus la capacidad del flujo de los cuerpos receptores ya sea el</p>

	<p>sistema de alcantarillado de drenaje o cuerpos naturales</p> <p>Cuando se utilicen estructuras de retención, se deben implementar sistemas de cribado y sedimentación, prever la facilidad del mantenimiento manual o mecánico, la accesibilidad y medios de transportar los desechos a los sitios finales de suposición, de acuerdo con su composición y la normatividad vigente”</p>
<p>LEGISLACIÓN VIGENTE A NIVEL DISTRITAL BOGOTÁ D.C</p>	
<p>Norma Técnica de Servicio NS-166 de 2018 EAAB</p>	<p>Expone los criterios para el diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). Al mismo tiempo especificaciones de materiales, estructuras anexas y mantenimiento para las tipologías.</p>
<p>Decreto 88 de 2017 por la Alcaldía Mayor de Bogotá</p>	<p>“Artículo 56 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS. Dentro de los diseños de alcantarillado pluvial de las actuaciones urbanísticas, los predios sujetos a Planes Parciales y a licencias de urbanización deberán garantizar que el sistema urbano de drenaje sostenible retenga como mínimo el 30 % de las aguas lluvias en el interior del área neta urbanizable del desarrollo calculado con un período de retorno de 25 años o de acuerdo a la norma que expida la Empresa de Acueducto de Bogotá Del 30% de retención obligatoria dentro del área neta urbanizable, por lo menos el 10 % deberá hacerse al interior de las áreas útiles y 10 % deberá hacerse en las cesiones para vías, parques y zonas verdes, dejando el restante 10 % en cualquier área dentro del área neta urbanizable del proyecto urbanístico Sin perjuicio de los anterior, será la Empresa de</p>

	Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAB la que apruebe los diseños de dicho alcantarillado pluvial”
Resolución 6523 de 2011 por la Secretaria Distrital de Ambiente	“Artículo 1 tiene por objeto reglamentar y adoptar los lineamientos técnicos para los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en el plan de ordenamiento zonal norte (POZN), contribuyendo así a minimizar los impactos del desarrollo urbano, en cuanto a la reducción de volúmenes de aguas contaminadas en los medios receptores y la reducción del riesgo de inundaciones derivado de volúmenes y caudales punta de escorrentía”
Acuerdo Distrital 418 de 2009 por la Alcaldía Mayor de Bogotá	“La Administración Distrital promoverá el urbanismo sostenible mediante el conocimiento, divulgación e implementación progresiva y adecuada de techos, terrazas verdes entre otras tecnologías, en los proyectos inmobiliarios públicos de carácter Distrital y privados nuevos o existentes de la Ciudad, como medida de adaptación y mitigación al cambio climático”
Resolución 5926 de 2011 por la Secretaria Distrital de Ambiente	“tiene por objeto crear y regular el Programa de Reconocimiento Ambiental a Edificaciones Ecoeficientes – PRECO, además de promover proyectos constructivos eco eficientes, amigables con el entorno, que propendan por la

	implementación de nuevas tecnologías que favorezcan la sostenibilidad ambiental”
--	--

Tabla 1. Marco normativo y legal

Fuente: propia.

3.4 MARCO GEOGRÁFICO

El área de estudio se encuentra en la Unidad de Gestión del Sistema de Alcantarillado Pluvial (UGA) 043 en la cuenca del Río Salitre y la subcuenca del Río Molinos que nace en los Cerros Orientales, está ubicada en la zona norte de la ciudad de Bogotá en la localidad de Usaquén en inmediaciones entre la Carrera 12 y Carrera 5 E y Calles 108 y 112, limita hacia el norte con la UGA 042, hacia el sur con la UGA 058, en el occidente con las UGA 056 y 059, por último, hacia el este con los cerros orientales de la ciudad.

La Unidad de Gestión de Alcantarillado (UGA), hace referencia a divisiones de menor área de las subcuencas en Bogotá que comparten una red de drenaje. En la Figura 9, se muestra la delimitación de la UGA (043) donde se encuentra ubicada la zona de estudio.



Figura 9. Ubicación geográfica de la UGA 043

Fuente: (propia, adaptada de Mapas Bogotá)

3.5 ESTADO DEL ARTE

Con el propósito de hacer un manejo integral de las aguas lluvias se han planteado estrategias durante las últimas décadas entre las cuales se encuentran las tipologías SUDS. A continuación, se presentan algunos antecedentes, estrategias, aplicaciones e investigaciones a nivel internacional y local para el manejo de las aguas lluvias de forma sostenible.

Uno de los mejores ejemplos al momento de referirse hacia los sistemas de drenaje urbano sostenible apunta a China, un país que ha experimentado un acelerado desarrollo y crecimiento urbano durante las últimas tres décadas, pero que ha traído consecuencias indeseables como frecuentes inundaciones urbanas que conllevan a un deterioro del patrimonio, pérdidas económicas y de vidas humana. Por tal razón, a partir de 2012 se ha adoptado el término de “Ciudad esponja” las cuales se caracterizan por “tener una elasticidad para adaptarse a los cambios ambientales afrontando los desastres naturales, cuando llueve absorbe agua, almacena agua, filtra el agua y limpia el agua” (Wang K et al, 2020, p. 2). Lo anterior revoluciona el urbanismo y se traza como meta una convivencia entre la naturaleza y la infraestructura gris, transformando las amenazas en beneficios para la comunidad. Con el fin de implementar los SUDS a gran escala, se han hecho pruebas en algunas provincias y ciudades chinas para evaluar su aporte y contribución junto con el objetivo a futuro de poder reutilizar un 70 % de las aguas lluvias, resalta entonces las aplicaciones en Shenzhen donde se ha optado por materiales como celosías, pavimentos permeables, techos y muros vegetados para la absorción de las aguas lluvias junto con humedales artificiales para la detección y absorción de la escorrentía (Jenkins M, 2020).

Por otro lado, en Reino Unido se ha hecho énfasis en la gestión del riesgo de inundaciones, así como también en el desarrollo de sistemas de drenaje urbano sostenible, en países como Escocia han dado el paso para que la aplicación de SUDS sea obligatorio en las construcciones civiles (Silva J, 2019, p.32).

Adicionalmente, se debe recalcar la elaboración de manuales y especificaciones técnicas para el diseño y construcción de sistemas de drenaje urbano sostenible, entre los cuales se encuentran “The SUDS Manual” y la “Guía de orientación para la construcción de SUDS” elaborado por CIRIA y el Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales. También es importante la construcción e implementación de cunetas verdes y zonas de bioretención en ciudades como Leicester y Northampton.

En Países Bajos se puede resaltar la construcción y adecuación de la Plaza de Agua de Benthemplein, la cual consiste en tres grandes cuencas secas de detención cubiertas de concreto que almacenan las aguas lluvias y las descargan de manera controlada al sistema de drenaje, en tiempo seco brinda un espacio de recreación, con canchas múltiples de baloncesto, voleibol, fútbol y asientos para las personas, como también amplios canales para la conducción de la escorrentía que funcionan como pistas y rampas para patinaje (Bravo D, 2020).

En la Figura 10, se muestra el almacenamiento temporal de las aguas lluvias que luego serán drenadas de forma controlada a la red de alcantarillado.



Figura 10. Plaza de Benthemplein inundada después de un evento

Fuente: (uncube, s.f)

Igualmente, sobresale el Tanner Spring Park en la ciudad de Oregón en Estados Unidos, el cual fue modificado desde un espacio que era antiguamente industrial a un entorno que incluye un gran estanque natural donde escurren las aguas lluvias y son almacenadas en un humedal artificial. Al mismo tiempo presenta amplias zonas verdes con vegetación y espacios para el disfrute de la población. (Greenworks, s.f).

En la Figura 11, se observa cómo la escorrentía que circula por las calles aledañas es captada y transportada hacia el humedal, allí las aguas lluvias circulan, son almacenadas y se infiltran hacia el subsuelo.



Figura 11. Funcionamiento humedal artificial en Tanner Spring Park

Fuente: (Arizona State University, 2018)

Ya en un ámbito local, se puede reconocer el uso de tanques de almacenamiento Aquacell para la recolección de aguas lluvias en el Centro Comercial Parque La Colina en la ciudad de Bogotá, los cuales almacenan la escorrentía proveniente de cubiertas y zonas duras para posterior uso en baterías sanitarias. (PAVCO, 2017).

Otra de las aplicaciones de tipologías de drenaje urbano sostenible se distingue en la Avenida Rincón entre La Conejera y la Avenida Tabor donde se realizó la construcción de alcorques inundables, los cuales brindan un almacenamiento de hasta 6 m³ de aguas lluvias, como también la construcción de zanjas de infiltración con módulos de celda en la Avenida Bosa entre la Avenida Mejía y Ciudad de Cali, los cuales pueden recolectar hasta 450 m³ de escorrentía. (Camacol, 2019)

Del mismo modo, en el Parque Metropolitano San Cristóbal Sur se han desarrollado estructuras como cunetas verdes y cuencas secas de drenaje extendido, donde de acuerdo al trabajo de Ramírez. (2018) “se presentan reducciones de caudales pico entre el 33.49 % y el 96.29%, al mismo tiempo que se evidencia remoción de contaminantes como TSS, Fósforo, Plomo y Aluminio” (p.104).

Por otro lado, es importante distinguir los avances por parte de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) en la elaboración de una normativa técnica de servicio NS-166, la cual da los criterios para el diseño y construcción de sistemas de drenajes

sostenibles. Asimismo, la colaboración entre la Universidad de los Andes y la EAAB para establecer una Guía Técnica de Diseño y Construcción de SUDS. En paralelo, el Ministerio de Ambiente y el Departamento Nacional de Planeación en 2018 hacen entrega de un documento con lineamientos para el diseño de sistema de drenaje urbano sostenible SUDS.

También es considerable destacar el trabajo de (Medina et al, 2018, pp. 92-93) en la elaboración de un análisis comparativo de los sistemas urbanos de drenaje sostenible en la Carrera 4 y Carrera 5, entre Calles 68 y 71 en la localidad de Chapinero Alto, donde se determina en primer lugar la capacidad de la red de drenaje combinado y posterior a esto la idoneidad de tipologías como alcorques inundables y pavimentos porosos para la gestión de la escorrentía en la zona. Igualmente es importante el trabajo de (Culman & Murcia, 2020, pp. 91-92) donde se hace un estudio de pre factibilidad para la incorporación de SUDS en la UGA 30 de la subcuenca Torca, donde se encuentra que debido a la alta urbanización y la falta de espacio no es posible aplicar las tipologías convencionales de drenaje urbano sostenible, más sin embargo abre una posibilidad para la implementación de techos verdes.

Por último, se le da importancia al trabajo de grado de (Borrero et al, 2016, pp. 104-105) en la evaluación del diseño y monitoreo de SUDS en la Avenida Rincón Tabor y Jardín Botánico, donde encuentran deficiencias en la selección y el diseño de tipologías en la avenida por parte de la constructora, como también errores por sobredimensionamiento, y recalcan la importancia del mantenimiento en estructuras como zanjas de infiltración para una correcta remoción de contaminantes.

4. METODOLOGÍA

4.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO

En la Tabla 2, se muestran las fases del trabajo las cuales comprenden 4 etapas que se desarrollaron.

OBJETIVO	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
<p>FASE 1: Planificar la estrategia para solucionar los problemas en la gestión integral de las aguas lluvias.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Búsqueda relacionada a planes y estrategias locales, para la gestión de las aguas lluvias en el lugar. 2. Reconocimiento sobre usos del suelo y stakeholders. 3. Definir los objetivos estratégicos que se esperan satisfacer mediante la aplicación de SUDS. 	<p>Describir el sitio y conocer las posibles limitaciones del diseño indagando en distintas instituciones.</p> <p>Conocer la situación actual del lugar respecto a los parámetros de Calidad, Cantidad, Aménidad y Biodiversidad.</p>
<p>FASE 2: Definir un diseño conceptual con las tipologías SUDS más idóneas.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recopilación y análisis de información correspondiente al sitio. 2. Selección de las tipologías de drenaje urbano sostenible a diseñar. 	<p>Búsqueda de características físicas del lugar como topografía, suelos, aguas subterráneas etc. A partir, de estudios, ensayos, investigaciones realizadas por otros autores en el área de diseño.</p> <p>Calificación y elección de las tipologías con base a los cuatro parámetros de la filosofía SUDS, mantenimiento y costos.</p>
<p>FASE 3: Dimensionar las tipologías SUDS establecidas en el diseño preliminar.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Obtener información de estaciones hidrometeorológicas y/o pluviométricas cercanas a la zona de estudio. 2. Calcular caudales y volúmenes de diseño. 3. Dimensionamiento de las estructuras del sistema urbano de drenaje sostenible, de acuerdo a la NS-166 y metodologías aplicadas en otros países. 	<p>Elaborar las curvas IDF y hietogramas que serán necesarios en la modelación y diseño de las tecnologías SUDS.</p> <p>Cuantificar las áreas, coeficientes de escorrentía y profundidades de lluvia para determinar los volúmenes de caudales de diseño.</p> <p>Determinar las dimensiones en cada tipología y las características de su estructura interna.</p>
<p>FASE 4: Valoración hidráulica de la red de alcantarillado pluvial existente</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificar la topología sobre la red de drenaje pluvial existente utilizando sistemas de información geográfica (SIG). 2. Modelar en el software EPA SWMM 5.1 la red de alcantarillado pluvial en periodos de retorno determinados 	<p>Representar en el software la red de alcantarillado pluvial existente.</p> <p>Analizar la capacidad de la infraestructura existente, velocidades de flujo como también los caudales de escorrentía en el lugar en condiciones actuales y con SUDS.</p>

	3.Comparar en el software SWMM los aportes de las estructuras de drenaje urbano sostenible.	Evaluar las contribuciones de las tipologías en la reducción de los caudales de escorrentía, flujos picos, y mejoras en la capacidad de la red existente.
--	---	---

Tabla 2. Metodología seguida en el trabajo para el diseño preliminar y evaluación de tipologías SUDS en el área de estudio.

Fuente: propia.

5. METAS ESTRATÉGICAS PARA LA GESTIÓN DE LAS AGUAS LLUVIAS

5.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO

El sitio de estudio, como se ha dicho anteriormente, se encuentra ubicado en la UPZ-14 de la localidad de Usaquén al nororiente de la ciudad de Bogotá. Antiguamente, el lugar se había caracterizado por ser un asentamiento para grandes haciendas que hoy en día se han convertido en urbanizaciones y centros comerciales (Alcaldía de Bogotá, s.f). Al mismo tiempo, se identifica como una zona con una gran riqueza en cuanto a recursos hídricos entre los que se encuentra, por ejemplo: la cuenca del Río Torca, Quebrada Santa Bárbara, Quebrada Pozo Claro, la Quebrada San Cristóbal, como también el canal pluvial del Río Molinos que comprende las aguas de este y la Quebrada La Chorrera que desembocan juntos en el Humedal Córdoba (DAMA, 2003).

De acuerdo a datos de la veeduría distrital en 2019, la localidad de Usaquén cuenta con una extensión de 6520 hectáreas con un tipo de suelo 44 % Rural y 52 % Urbano, donde la UPZ-14 aporta un área de 492,3 hectáreas. La construcción de importantes vías como la Avenida Alberto Lleras Camargo, la Carrera 9 y la Autopista Norte transformaron el paisaje natural del sector y dieron paso a lo largo de décadas a un amplio desarrollo urbano, a tal punto que se ha convertido en un referente en el crecimiento de predios residenciales, empresariales y comerciales en la localidad. Según cifras del Observatorio de Desarrollo Económico y el DANE, “la localidad de Usaquén en los últimos meses del 2019 registró la mayor cantidad de metros cuadrados en proceso de construcción junto con localidades como Suba y Chapinero sumando 2.5 millones de m²” (Nocua, 2020), mientras en 2015 presentó la mayor participación en construcción de vivienda en la ciudad con un aporte del 27,1 %, como también destaca la construcción de oficinas o edificaciones no residenciales con 17,7 % del total de la ciudad

(Bustamante, 2015). Asimismo, se registró un aumento de 1000 % en tan solo 10 años en el uso de grandes almacenes comerciales en el periodo de 2002 a 2010 (Trujillo, 2013)

5.1.1 Revisión a planes locales

Haciendo una revisión acerca de las metas a futuro en la localidad de Usaquén, se encuentra el Plan de Desarrollo Económico, Social, Ambiental y de Obras Públicas 2021-2024, el cual establece como propósitos convertir la localidad en un territorio ambientalmente sostenible y que se adapte a la crisis climática para hacer frente a sus efectos mediante el Plan “Usaquén Reverdece 2021-2024”. También, se tiene como meta promover emprendimientos en procesos de reconversión hacia actividades sostenibles, promover el cuidado y prevenir el deterioro mediante una educación ambiental, adecuación y mejoramiento de espacios verdes como parques. Adicionalmente, se establece como metas construir 167 m² de muros y techos verdes e intervenir 9.000 m² de jardinería y coberturas verdes, plantar 340 árboles urbanos y rurales, intervenir 1.700 m² de espacio público para conservación y construcción como también 800 metros lineales de ciclorutas. (Junta Administradora Local, 2020, pp. 7-21).

Al mismo tiempo, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) establece en su Plan General Estratégico 2020-2024 proyectos como arborización urbana, la construcción de senderos ecológicos peatonales y para bicicletas, mitigación y adaptación de los efectos del cambio climático, como también dar cumplimiento a las metas propuestas en los Objetivos del Desarrollo Sostenible - 2030. (EAAB-ESP, 2020, p.80).

Por otro lado, el Plan Local de Arborización en la localidad de Usaquén establece en su cronograma de ejecución metas para 2021-2024 y 2025- 2028 la plantación de árboles nuevos, el establecimiento y mejoras de zonas verdes. (SDA et al, 2017).

Por último, se recalca la implementación del sistema férreo Regiotram Norte, el cual va conectar a Bogotá con municipios como Chía y Cajicá, es crucial porque este proyecto es aledaño a las vías del tren en la Carrera 9 entre Calle 108 y 112. El conocimiento de los planes locales en la zona de estudio es primordial para saber de forma preliminar si el diseño e implementación de tipologías SUDS es factible, o si ocupará un espacio que ya está destinado a otro tipo de infraestructura.

5.1.2 Usos del suelo

El sitio de estudio ubicado en el sector 14 y 16 de la UPZ Usaquéen, es considerado como sector residencial delimitado por áreas comerciales, institucionales y de servicios, la cual ha sido tratada como una zona de consolidación urbana. En la Figura 12, se muestra los usos del suelo identificados en las inmediaciones del proyecto.



Figura 12. Usos del suelo en el área del proyecto

Fuente: (propia, adaptada de Mapas Bogotá)

En sentido Sur- Norte desde la Calle 108 a 110 se identifican viviendas en propiedad horizontal entre uno y dos pisos, desde la Calle 110 a 112 se identifica una gran área de uso comercial conformada por el Centro Comercial Santa Ana, una cicloruta y a sus alrededores la Embajada de México y el Hotel Radisson Royal.

Se identifica también un amplio separador verde donde se encuentra ubicada la Estación del Tren de Usaquéen la cual es considerada un patrimonio histórico, cultural y un sitio turístico de la localidad. Asimismo, se ubica la carrilera del tren de la Sabana.

5.1.3 Stakeholders

Entre las partes interesadas, se encuentra en primer lugar la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), la cual de acuerdo al Decreto 597 de 2018 le corresponde las labores de construcción, mantenimiento y operación de los SUDS en la ciudad. Asimismo, tendrá que seguir los lineamientos de los Planes de Desarrollo Local, Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) y Planes de Ordenamiento Territorial. Al mismo tiempo, la Secretaria Distrital de Ambiente quien promueve, orienta y regula la sostenibilidad en Bogotá, el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) que se encarga de promover programas y proyectos para mitigar los riesgos por el cambio climático en la ciudad, El Jardín Botánico José Celestino Mutis quien tiene la responsabilidad de gestionar las coberturas verdes y conservación de la flora, como también el Instituto Distrital de Protección y Bienestar Animal para la protección y mantener el bienestar de la fauna silvestre y doméstica.

Es relevante igualmente la participación de los ciudadanos y habitantes en la zona del proyecto, pues se requiere aplicar también medidas no estructurales para una adecuada gestión de las aguas lluvias, es importante mantener un diálogo y conocer el interés por parte de los propietarios de viviendas, centros comerciales y embajadas para implementar tipologías de drenaje urbano sostenibles individuales como cubiertas verdes y tanques de almacenamiento para aguas lluvias o infiltración. Al mismo tiempo, se requiere de una educación ambiental para los transeúntes, conductores y ciclistas que se movilizan por la zona de estudio, una concientización colectiva que ayude a entender la importancia o beneficio de los SUDS y al mismo tiempo contribuyan a su preservación y conservación.

5.2 OBJETIVOS ESTRATÉGICOS PARA LA GESTIÓN DE LAS AGUAS LLUVIAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Teniendo en cuenta la filosofía de los Sistema de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS), se identifican en la zona de estudio las metas a lograr para una gestión integral de las aguas lluvias, esto para seleccionar de manera preliminar en el diseño conceptual las tipologías estructurales más adecuadas para cumplir con los objetivos trazados.

5.2.1 Situación del lugar respecto al parámetro “Cantidad de agua”

De acuerdo al trabajo conjunto del Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), la UGA 043 tiene un alto rango en priorización para manejo de escorrentía y calidad del agua en ríos. Asimismo, indica que por las propiedades de infiltración del suelo es posible asegurar una recarga de acuíferos. (Martínez, 2017, p.20,74).

Al mismo tiempo el informe de Caracterización General de Escenarios de Riesgo CLGR-CC en 2017, establece que la zona de la Carrera 9 con Calle 109 se presentan encharcamientos por la topografía suavemente inclinada, la cual favorece a que se presente una obstaculización de las aguas lluvias que vienen de las áreas próximas a los Cerros Orientales. (CLGR-CC, 2017, p.14).

5.2.2 Situación del lugar respecto al parámetro “Calidad de agua”

Debido al tráfico vehicular en la zona es importante asegurar un tratamiento de la escorrentía que reduzca la concentración de contaminantes como sedimentos, metales pesados, derivados de aceites combustibles, grasas y productos automotrices. Lo anterior, con el objetivo de evitar la colmatación de los colectores y mejorar la calidad de las aguas que se vierten al Canal del Río Molinos y el Humedal Córdoba.

5.2.3 Situación del lugar respecto al parámetro “Amenidad”

Es posible mejorar el paisaje urbano entre la Calle 110 a 112 y brindarles a ciclistas como transeúntes un espacio y entorno más agradable, con mejor calidad del aire, que permita la captura de CO₂ y retención de material particulado. Lo anterior, se puede lograr ya sea reemplazando las áreas duras por zonas verdes, como también modificando algunos espacios verdes en el separador donde se ubica la Estación del Tren de la Sabana.

5.2.4 Situación del lugar respecto al parámetro “Biodiversidad”

La vegetación en Usaquéen tiene un gran valor ecológico donde en áreas desarrolladas es común encontrar especies ornamentales de origen nativo y exótico, así mismo, se encuentran parches de bosque donde se identifican bejucos, gramíneas, chuscal, encenillal, etc. De acuerdo a cifras del Plan Local de Arborización Urbana en Usaquéen a 2017, se detectaban 113.776

árboles, de los cuales un 42.1 % son nativos y 57.9 % foráneos (SDA et al, 2017, p.6) los cuales brindan un hábitat para distintas especies de aves y demás animales.

6. DISEÑO CONCEPTUAL

6.1 CARACTERIZACIÓN DEL SITIO

6.1.1 Topografía

En el tramo de estudio, la Carrera 9 entre Calles 108 y 102 como anteriormente se mencionó, se caracteriza por ser terrenos con una topografía suavemente inclinada con pendientes entre 0% - 3%, lo cual lo convierte en una zona propensa a encharcamientos y obstaculización de aguas lluvias. En la Figura 13, se muestra las pendientes en la UGA 043, en la imagen ampliada, justo en la parte inferior es donde se plantea diseñar las estructuras de drenaje sostenible y de acuerdo a la leyenda se confirman pendientes entre 0% - 2%.

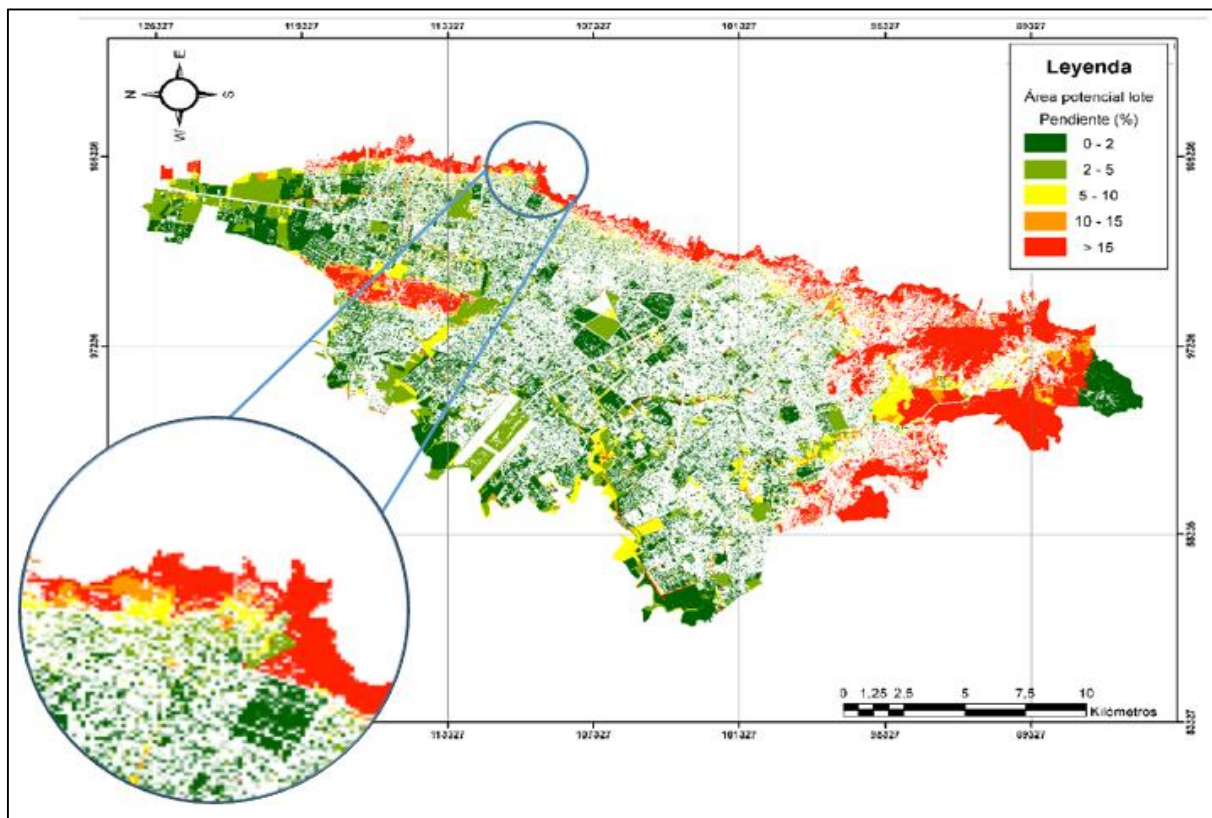


Figura 13. Mapa pendiente del terreno en áreas potenciales para implementación de SUDS.

Fuente: (Adaptado de Martínez, 2017)

En la Figura 14, se observa un terreno suavemente inclinado donde en una diferencia de cotas de tan solo un metro, se pueden encontrar distancias horizontales de hasta 70 metros, dando una pendiente entre 1% y 2%.

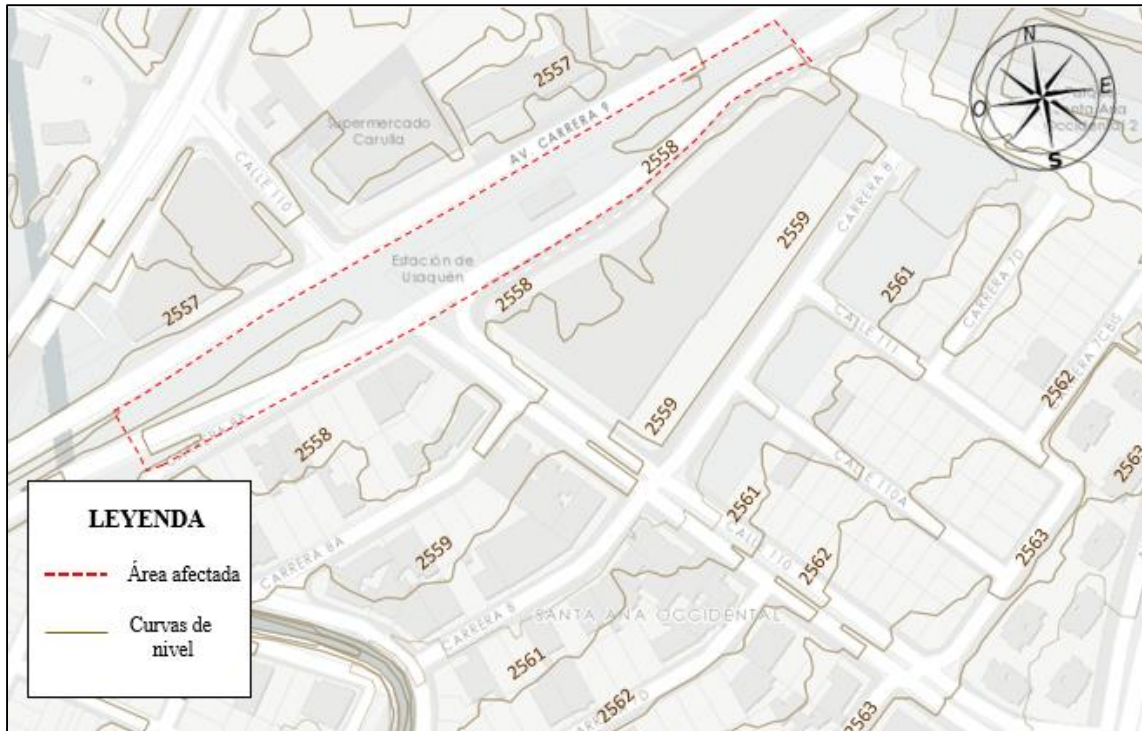


Figura 14. Curvas de nivel en el área de afectación

Fuente: (Adaptado de Mapas Bogotá, 2020)

6.1.2 Rutas de flujo y puntos de descarga

Conocer la topografía del sitio es una herramienta para entender las rutas de flujo de la escorrentía y sus puntos donde descarga. Como se observa en la Figura 15, las aguas lluvias se transportan desde la zona más alta y con mayor inclinación cercana a los Cerros Orientales entre la Avenida Carrera 7 y Carrera 4E, donde también se identifican suelos con un bajo potencial de infiltración. Parte de las aguas lluvias son dirigidas hacia el Canal del Río Molinos, más, sin embargo, otra fluye hacia las zonas más bajas y con topografía suavemente inclinada como la Carrera 9 entre Calle 108 y 112 donde se localiza el área para el prediseño de las tipologías SUDS. Esta zona recibe también las aguas de escorrentía que provienen del norte y sur donde se ha podido inferir que, debido a la existencia del separador de la Estación del Tren

Usaquén, junto con la baja inclinación del sitio, aportan a que se presente una obstaculización del flujo natural de las aguas lluvias y al mismo tiempo un estancamiento de estas.

Se observa de igual modo en la Figura 15, que el sitio de estudio cuenta con un buen potencial de infiltración.

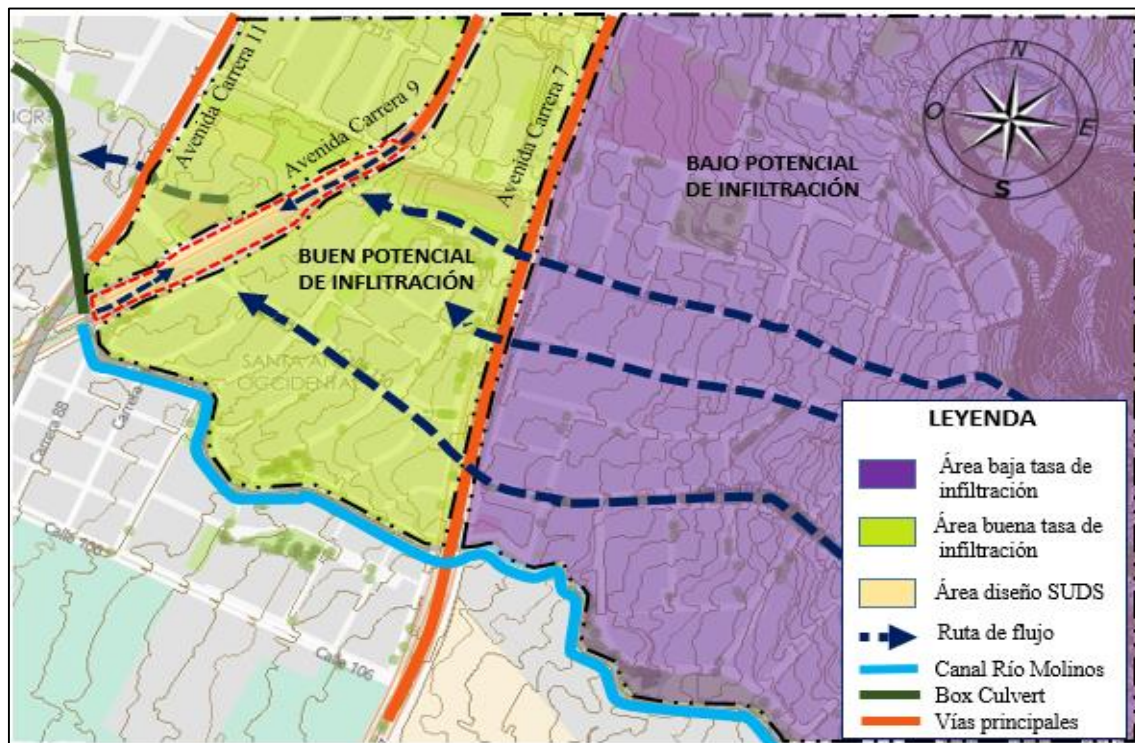


Figura 15. Rutas de flujo de la escorrentía con puntos de descarga en la UGA 043 y área de diseño

Fuente: (Adaptado de Mapas Bogotá, 2020)

6.1.3 Potencial de infiltración

Para analizar el potencial de infiltración en el área de estudio, es necesario en primer lugar conocer los niveles freáticos de las aguas subterráneas. De acuerdo al trabajo del Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) de la Universidad de los Andes y la Figura 16, se puede identificar en la zona de estudio distancias del nivel freático entre 1.26 m - 3 m. De acuerdo a la NS-166, la mayoría de tipologías de drenajes urbanos sostenibles requieren de una distancia al nivel freático superior a un metro.

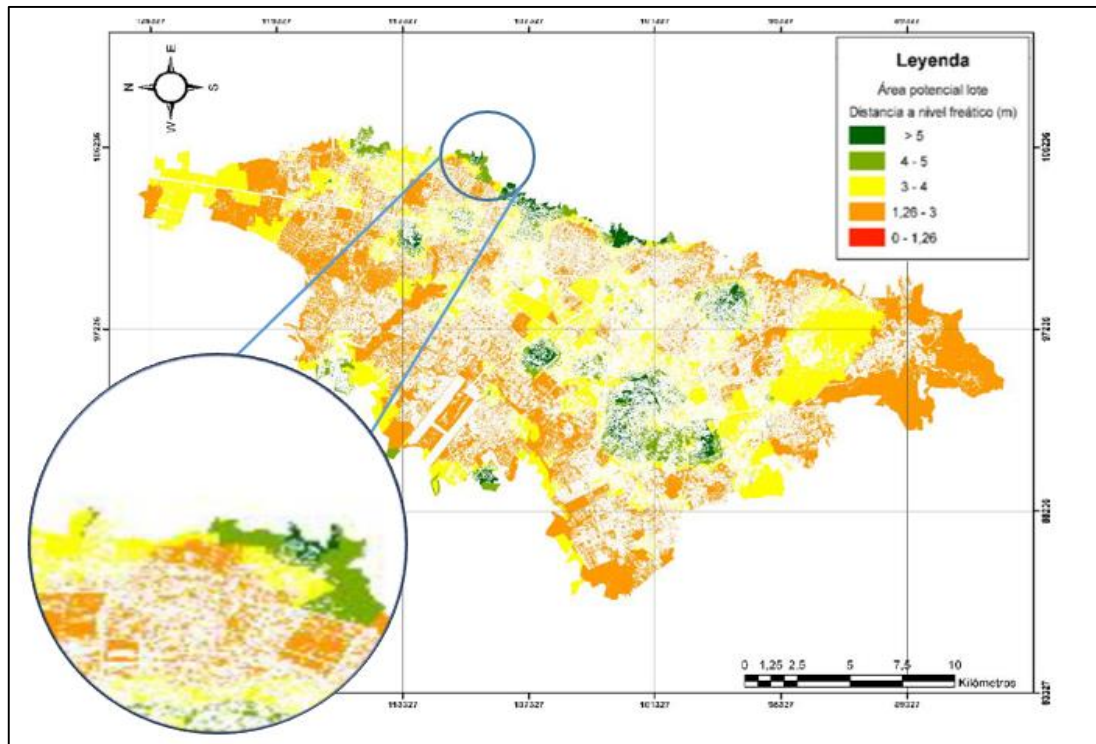


Figura 16. Mapa distancia a nivel freático en áreas potenciales para implementación de SUDS.

Fuente: (Adaptado de Martínez, 2017)

Otro aspecto determinante para el diseño de SUDS es la permeabilidad del suelo, observando Figura 17 en la imagen ampliada en su parte inferior se pueden inferir tasas de infiltración entre 15-30 mm/h a partir de la leyenda, en algunos puntos puede ser superior a 30 mm/h. Relacionando lo anterior con la Figura 15, se corrobora que sobre la Carrera 7 el potencial de infiltración es menos favorable respecto a la zona de estudio. Con los valores anteriores, se puede clasificar la rata de infiltración del suelo como una velocidad moderada o moderadamente lenta y a partir de ello considerar que es una restricción adecuada para poder asegurar una infiltración completa o parcial en las estructuras de drenaje sostenible.

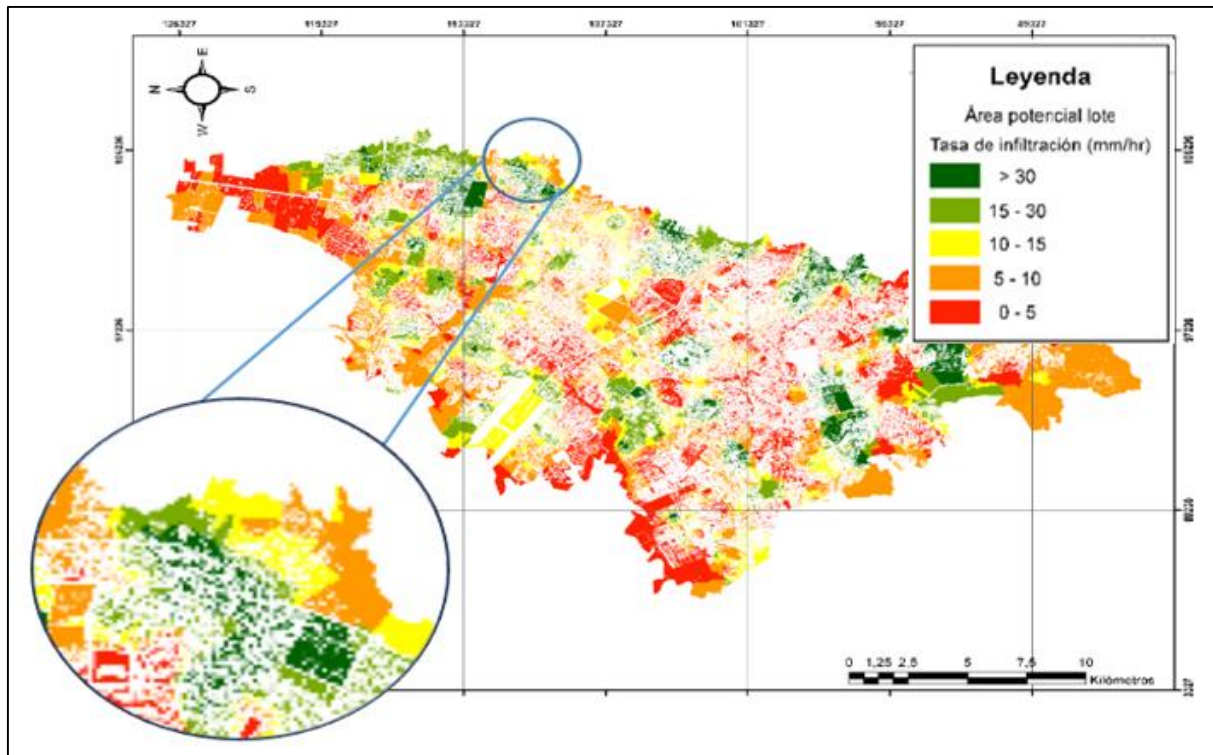


Figura 17. Mapa de tasas de infiltración en áreas potenciales para implementación de SUDS.

Fuente: (Adaptado de Martínez, 2017)

6.1.4 Infraestructura existente

Teniendo en cuenta la Figura 18, se encuentra que el sitio es drenado mediante una red de alcantarillado pluvial que luego se conecta por la Carrera 11 con un box coulvert, el cual descarga las aguas lluvias en el Humedal Córdoba.



Figura 18. Red de alcantarillado pluvial existente en el área de diseño

Fuente: (Geoportal EAAB, 2020)

6.1.5 Suelos y geotecnia

Para comprender mejor las características del lugar vistas anteriormente, es necesario conocer los suelos en la zona de estudio, los cuales de acuerdo a la zonificación de la respuesta sísmica para el diseño de edificaciones sismo resistentes en Bogotá y según la Figura 19, se clasifican como Depósitos Fluvio - Lacustres o Lacustre A, los cuales se encuentran “compuestos por arcillas plásticas y muy blandas, algunos lentes de arena suelta e intercalaciones de cenizas volcánicas, de igual manera se pueden encontrar turbas o suelo con alto contenido de materia orgánica” (Alcaldía Mayor de Bogotá - Fondo de Prevención y Atención de Emergencia, 2010, p.33).

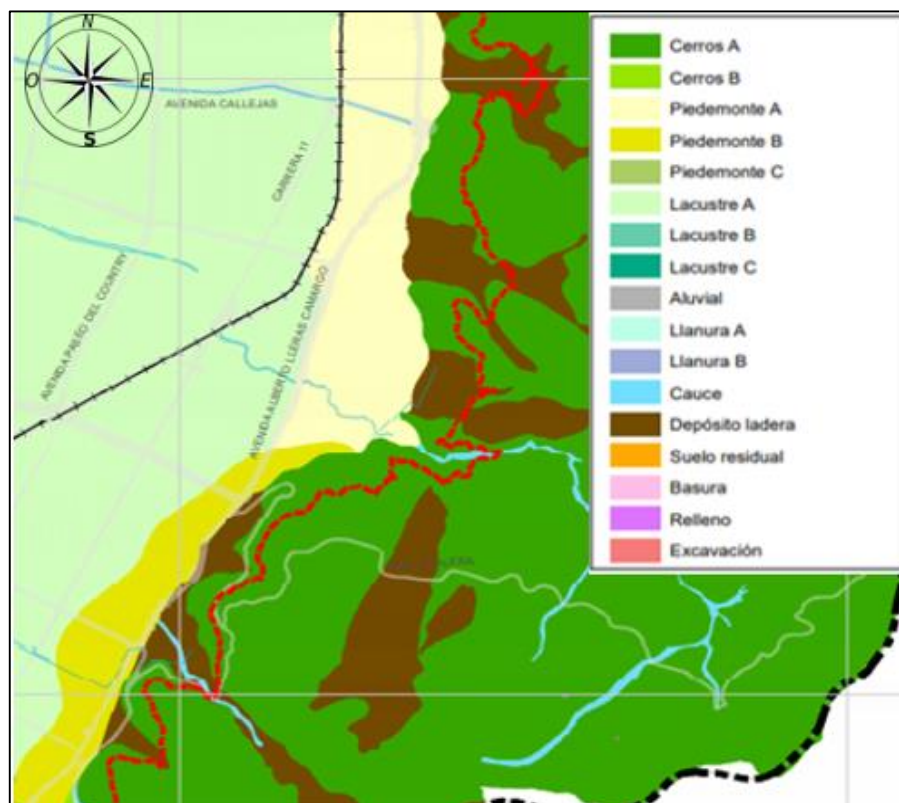


Figura 19. Mapa zonificación geotécnica en el área de diseño para identificar suelo presente.

Fuente: (Adaptado de SCG, 2010)

Partiendo de la formación de tipo lacustre de los suelos, es posible inferir un arrastre y depósito de sedimentos por parte del Río Molinos y la Quebrada Santa Ana formando abanicos que se extendieron y formaron las planicies que componen la topografía del área de estudio, a partir de ello es posible comprender la razón de su geomorfología plana o poco inclinada, la

alta presencia de sedimentos de grano fino y materia orgánica, como también la poca distancia entre la superficie y el nivel de aguas freáticas. Aunque la abundancia de arcillas muy blandas podrían dar a inferir que la tasa de infiltración del suelo es significativamente baja, la ubicación próxima del sitio a una zona clasificada como Piedemonte (Ver Figura 19). En la Figura 20 se observa un perfil de los suelos existentes donde se muestra una vasta capa de suelos residuales que puede alcanzar espesores cercanos a los 20 m antes de llegar a las arcillas blandas, esto puede explicar la velocidad de infiltración moderada que se presenta.

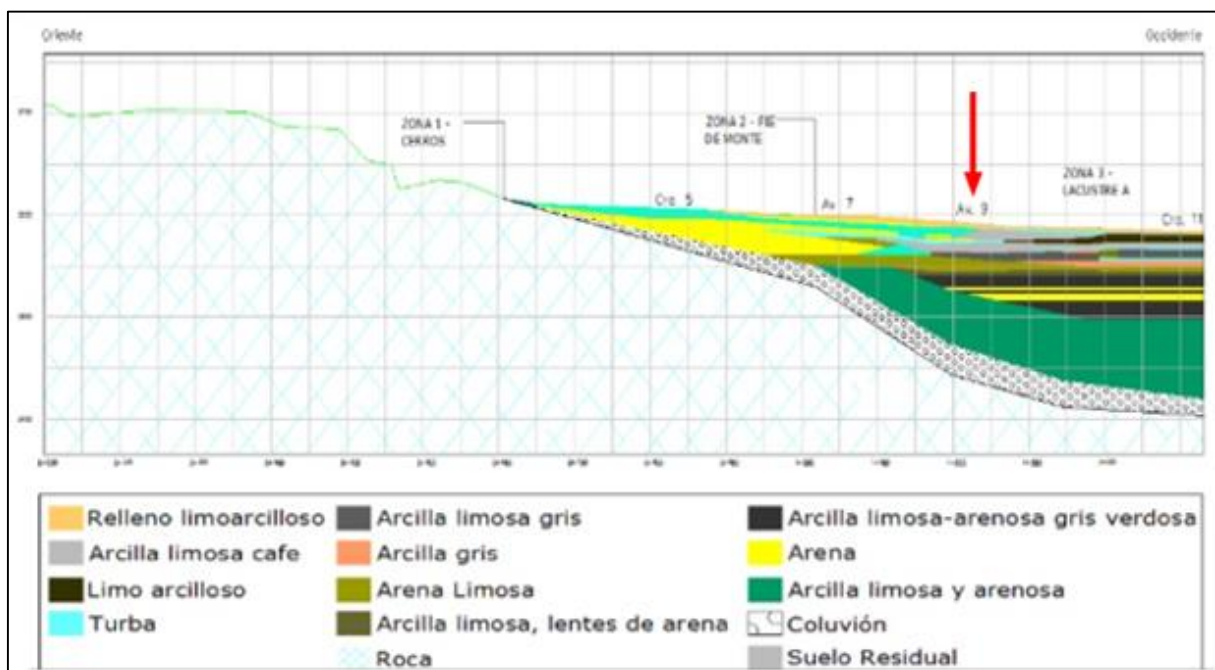


Figura 20. Perfil de los suelos existentes entre los Cerros Orientales y la Carrera 15 Sector Santa Ana próximo al área de diseño

Fuente: (Rodríguez E, 2015)

6.2 SELECCIÓN DE TIPOLOGÍAS SUDS PARA EL PREDISEÑO

6.2.1 Preselección de tipologías de acuerdo a áreas potenciales

De acuerdo a los espacios disponibles se hace una selección de las tipologías SUDS más apropiadas para el sitio de estudio teniendo en cuenta la Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible elaborada por el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), se hace la preselección con base a la Tabla 3.

Tipologías Áreas potenciales	Tanque de almacenamiento	Zona de bio-retención	Alcorque Inundable	Cuneta verde	Zanja filtrante	Cuenca seca de drenaje extendido	Pavimento Permeable
Andenes	X	X	X				X
Zonas comerciales	X	X	X				
Zonas institucionales	X	X	X				
Separadores viales	X	X	X	X	X		X
Jardines domiciliars	X	X					X

Tabla 3. Preselección de tipologías SUDS con base a áreas potenciales del lugar

Fuente: propia (adaptada de CIIA & EAAB, 2017)

Siguiendo los parámetros de las áreas potenciales en la Tabla 3, identificadas en el área de estudio se preseleccionan las siguientes tipologías de drenaje urbano sostenible: tanque de almacenamiento, zonas de bio-retención, alcorques inundables, cunetas verdes, zanja filtrante y pavimentos permeables.

6.2.2 Preselección de tipologías de acuerdo a características del sitio

Con las tipologías preseleccionadas anteriormente, se evalúa su factibilidad en el sitio con base a la

Tabla 4 de acuerdo a las características encontradas, las cuales se resumen a continuación:

- Pendiente del terreno: 0 - 3 %
- Distancia a nivel freático: 1.26 m - 3.0 m
- Tasa de infiltración: 15-30 mm/h
- Distancia a cimientos: variable de acuerdo al sitio de ubicación de la tipología

Parámetro	Tipo de restricción por valor	Cunetas verdes	Pavimentos Permeables	Zona de bioretención	Alcorque inundable	Zanja filtrante	Tanque de almacenamiento
Pendiente (%)	Máximo	10	5	10	10	5	-
	Mínimo	1	0.5	1	1	-	1
Distancia al nivel freático (m)	Mínimo	1.5	3	1.8	1	3	2
Tasa de infiltración del suelo (mm/h)	Mínimo	13	13	7	7	7	-
Distancia a cimientos (m)	Mínimo	4	6	6	2	6	-

Tabla 4. Restricciones según características y parámetros del sitio

Fuente: propia (adaptada de CIIA & EAAB, 2017)

A partir de la

Tabla 4, se relaciona que todas las tipologías preseleccionadas anteriormente se adaptan a las pendientes en el sitio y a la tasa de infiltración del terreno. Respecto a la distancia a nivel freático la mayoría de tipologías se presenta una restricción importante y aunque “The SUDS Manual” sugiere que con un metro de distancia es suficiente, es recomendable tener en cuenta que altos niveles freáticos bajo la superficie pueden ocasionar situaciones indeseadas como la imposibilidad de asegurar una infiltración completa, la probabilidad que ingresen aguas subterráneas a la tipología y reduzca su capacidad de almacenamiento, o se presenten sobrecargas impuestas y falle la estructura.

6.2.3 Preselección de tipologías de acuerdo a mejora en la calidad del agua

Para este parámetro se hace una determinación acerca de los contaminantes que pueden estar presentes en el área de estudio, de esta manera se hace una preselección de las tipologías SUDS más adecuadas para el tratamiento de la escorrentía y que presenten asimismo una mayor eficiencia de remoción.

En la Tabla 5, se hace una valoración de las tipologías preseleccionadas por medio de una matriz de evaluación de acuerdo a la eficiencia en la remoción de contaminantes tomada de la “Guía técnica de diseño y construcción de SUDS” elaborada por el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA).

Tipología	Cunetas verdes	Pavimentos Permeables	Zona de Bioretención	Alcorque inundable	Zanja filtrante	Tanque de Almacenamiento
Contaminante						
Sedimentos	M	A	M	M	A	N/A
Metales	B	M	B	B	A	
Aceites y grasas	M	A	A	A	M	
TOTAL	5	7	6	6	7	0

Tabla 5. Calificación de tipologías de acuerdo a eficiencia en remoción de contaminantes a la escorrentía

Fuente: propia (adaptada de CIIA & EAAB, 2017)

Las eficiencias de remoción, de acuerdo al Boston Water and Sewer Commission para realizar una valoración cualitativa de las tipologías de drenaje urbano sostenible se clasifican entre baja, media y alta, las cuales tienen un puntaje de 1,2 y 3 respectivamente.

B: eficiencia baja (< 30%)

M: eficiencia media (30 - 80 %)

A: eficiencia alta (> 80 %)

N/A: no aplica, el tanque de almacenamiento no remueve contaminantes, más sin embargo en sus estructuras de entrada pueden ir desarenadores y filtros que den un tratamiento a las aguas lluvias.

A partir de la evaluación cualitativa en la Tabla 5, se encuentra que la zanja filtrante cuenta con una alta eficiencia de remoción en sedimentos y metales, por otro lado, con los aceites y nutrientes presenta una valoración media por tal motivo es la tipología con mejor calificación para asegurar un adecuado tratamiento de la escorrentía. Con respecto a las otras estructuras: pavimentos permeables, zonas de bioretención y alcorques inundables, complementan mejor a las zanjas de infiltración al permitir una remoción superior en aceites y grasas. Por último, la cuneta verde fue la tipología menos calificada para mejorar la calidad de las aguas lluvias.

6.2.4 Preselección de tipologías de acuerdo a control de volumen de aguas lluvias

Por medio de una selección cualitativa, se determina las tipologías más correctas para garantizar una reducción del volumen que no es descargado hacia las estructuras de drenaje convencional, como también para disminuir los caudales picos por medio de detección y retención de la escorrentía de forma segura. En la Tabla 6, se muestra la evaluación de las tipologías determinando las más correctas para cumplir con el propósito de cantidad del agua.

Tipología \ Criterio de Volumen	Cunetas verdes	Pavimentos Permeables	Zona de bioretención	Alcorque Inundable	Zanja filtrante	Tanque de almacenamiento
Reducción de volumen	B	A	M	B	A	M
Reducción de caudales pico	B	M	B	B	A	M
TOTAL	2	5	3	2	6	4

Tabla 6. Calificación de tipologías de acuerdo a eficiencia en control de escorrentía

Fuente: propia (adaptada de CIIA & EAAB, 2017)

A partir de la Tabla 6, se encuentra que la zanja filtrante es la tipología mejor calificada, seguido por los pavimentos permeables y el tanque de almacenamiento que aportan una reducción media, respecto a los alcorques y zonas de bioretención presentan una baja capacidad para asegurar un control de volumen en las aguas lluvias al menos en amplios periodos de retorno. Por otro lado, con relación a la cuneta verde, presenta una baja eficiencia para controlar los volúmenes de aguas lluvias.

6.2.5 Preselección de tipologías de acuerdo a amenidad y conflictos de uso

Aspectos como la percepción positiva que tienen los habitantes sobre un sitio, la posibilidad de desarrollar distintas actividades comunes, como también disfrutar del paisaje de forma segura son notables en la selección de las tipologías SUDS. En la Tabla 7, se hace una calificación según la contribución de las estructuras al principio de amenidad.

Tipología Amenidad y conflictos de uso	Cunetas verdes	Pavimentos Permeables	Zona de bioretención	Alcorque Inundable	Zanja filtrante	Tanque de Almacenamiento
	Amenidad	M	N/A	A	M	N/A
Actividades en el sitio	A	B	A	B	M	B
Seguridad (para los usuarios)	A	B	M	B	M	B
TOTAL	8	2	8	4	4	2

Tabla 7. Calificación de tipologías de acuerdo a amenidad y conflictos de uso

Fuente: propia (adaptada de CIIA & EAAB, 2017)

6.2.6 Preselección de tipologías de acuerdo a mantenimiento

Las actividades de mantenimiento son esenciales para garantizar un correcto funcionamiento de los SUDS. En la Tabla 8, se enseña la evaluación de las tipologías de acuerdo a los requerimientos de mantenimiento.

Tipología Amenidad y conflictos de uso	Cunetas verdes			Pavimentos Permeables			Zona de Bioretención			Alcorque Inundable			Zanja filtrante			Tanque de Almacenamiento		
	M	S	A	M	S	A	M	S	A	M	S	A	M	S	A	M	S	A
Tipo																		
Regular	5	3	0	3	0	0	4	2	0	4	3	0	4	3	0	3	0	0
Ocasional	0	4	2	1	0	1	0	5	5	0	3	4	0	2	1	0	3	1
Correctivo	0	2	8	0	2	6	0	1	8	0	1	8	0	0	8	0	1	5
Riesgo de colmatación	B			A			M			M			A			B		
TOTAL	3			1			2			2			1			3		

Tabla 8. Calificación de tipologías de acuerdo a frecuencia en mantenimiento

Fuente: propia (adaptada de CIIA & EAAB, 2017)

6.2.7 Preselección de tipologías de acuerdo a los costos

Si bien el costo de las estructuras de drenaje sostenible es variable, es posible remitirse a una valoración cualitativa tomando como referencia el trabajo del Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes (CIIA), el cual ha recopilado bibliografía de distintas fuentes y evalúa el parámetro de costos según capital y mantenimiento. En la Tabla 9, se califican las tipologías de acuerdo a esta variable.

Tipología \ Costos	Cunetas verdes	Pavimentos Permeables	Zona de Bioretención	Alcorque Inundable	Zanja filtrante	Tanque de Almacenamiento
Costos de capital	B	A	M	M	M	M
Costos de mantenimiento	B	M	M	M	M	M
TOTAL	6	3	4	4	4	4

Tabla 9. Calificación de tipologías según costos

Fuente: propia (adaptada de CIIA & EAAB, 2017)

6.3 EVALUACIÓN PONDERADA DE LAS TIPOLOGÍAS SUDS

6.3.1 Evaluación ponderadas de tipologías preseleccionadas

Se asigna un peso a cada uno de los criterios de selección mostrados anteriormente de acuerdo a la importancia y problemas a solucionar. En la Tabla 10, se muestra la evaluación final de las estructuras de drenaje sostenible

Tipología \ Criterio de Selección	Cunetas verdes	Pavimentos Permeables	Zona de Bioretención	Alcorque Inundable	Zanja filtrante	Tanque de Almacenamiento
Mejoramiento en calidad del agua (25 %)	1.25	1.75	1.5	1.5	1.75	0
Control de volúmenes (35 %)	0.7	1.75	1.05	0.7	2.1	1.4
Amenidad y conflictos de uso (10 %)	0.8	0.2	0.8	0.4	0.4	0.2

Mantenimiento (15 %)	0.45	0.15	0.3	0.3	0.15	0.45
Costos (15 %)	0.6	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4
TOTAL	3.8	4.15	4.05	3.3	4.8	2.45

Tabla 10. Evaluación final de tipologías

Fuente: propia (adaptada de CIIA & EAAB, 2017)

A partir de la evaluación mostrada en la Tabla 10, se determina que las tres tipologías más idóneas a diseñar son las zanjas filtrantes, pavimentos permeables y zonas de bioretención, por tal motivo es indispensable incluirlas en el diseño conceptual. Por otro lado, aunque la cuneta verde obtiene una buena calificación por su alta amenidad, bajo mantenimiento y costo, no cumple lo suficiente con parámetros importantes como mejoramiento en la calidad de las aguas y control de volúmenes, por tal motivo se descarta. En cuanto a los tanques de atenuación, a pesar de tener la menor calificación por no proporcionar mejoras al paisaje urbano y su nulo aporte en reducción de contaminantes, es importante mantenerlo en el diseño ya que pueden almacenar y descargar de manera controlada grandes cantidades de escorrentía, lo cual aporta significativamente en la reducción de volúmenes de aguas lluvias.

6.3.2 Diseño conceptual

Seleccionadas las tipologías a partir de una calificación ponderada y bajo criterio, se muestra en la Figura 21 un diseño conceptual donde se determina la ubicación de las estructuras de drenaje sostenible en el área de estudio.

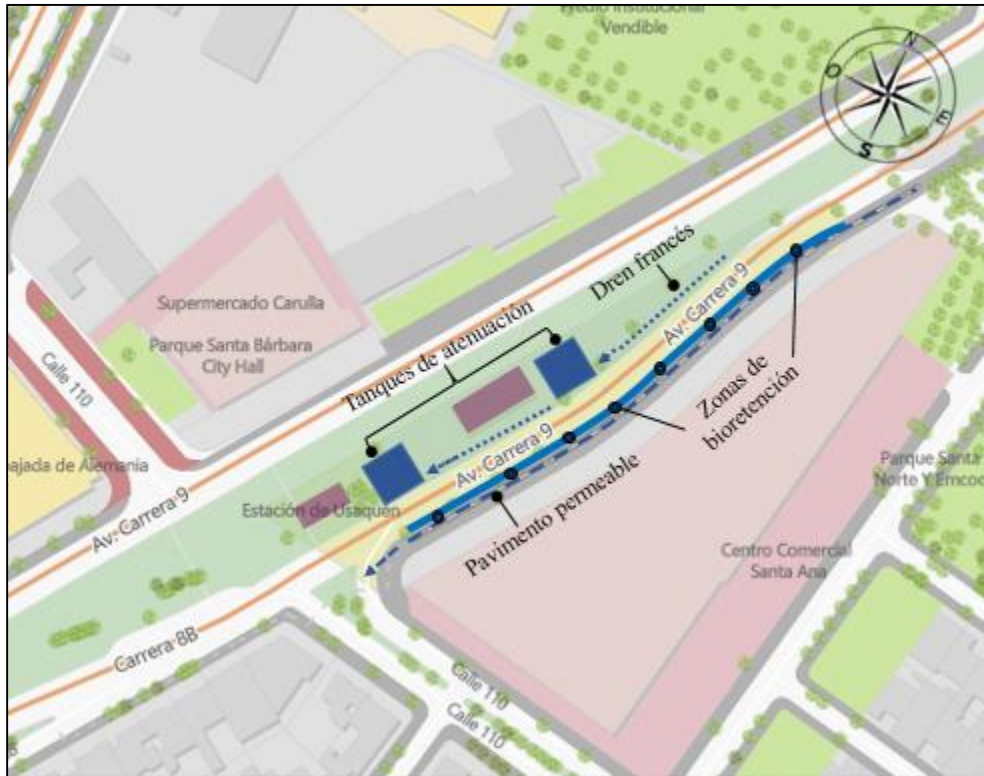


Figura 21. Diseño conceptual con tipologías seleccionadas

Fuente: propia (Adaptada de Mapas Bogotá, 2019)

Haciendo uso de los espacios presentes, se propone aprovechar la acera de la Carrera 9 entre Calles 110 y 112 para el diseño de zonas de bioretención junto al tramo de ciclovía, donde se propone reemplazar la capa de rodadura por un material permeable y garantizar un almacenamiento de las aguas lluvias en su estructura. Por otro lado, para el separador verde de la Estación del Tren de la Sabana, se plantean el diseño de zanjas filtrantes que hagan un tratamiento preliminar a la escorrentía, antes de ser conducida a tanques de atenuación para almacenarla temporalmente y hacer descarga moderada a la red de alcantarillado pluvial. Además, se decidió complementar estas dos tipologías, debido a que las zanjas filtrantes si bien tienen la calificación más alta, su aporte en la reducción del volumen y caudal de escorrentía es más significativo en periodos cortos de retorno y lo que se busca es brindar mejoras en el factor *Cantidad* para un lapso de tiempo mayor lo cual es posible con tanques de atenuación.

7. DISEÑO DE TIPOLOGÍAS SELECCIONADAS

7.1 DISEÑO HIDROLÓGICO

El diseño hidrológico de los sistemas de drenaje urbano sostenible, contempla la elaboración de curvas IDF a partir del manejo de datos de precipitaciones de estaciones ubicadas en los alrededores del área de estudio, se realizan hietogramas de precipitación, se determinan las profundidades de lluvia. Por otro lado, se identifican las áreas de aporte para cada estructura, y por último se asigna coeficientes de escorrentía para las superficies.

Tomando como guía la norma NS-166 de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y la Guía Técnica de Diseño y Construcción de SUDS del Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), se determinan los volúmenes de calidad (V_c), para tipologías que brindan un tratamiento a las aguas lluvias y aportan a una mejora en su calidad, estos volúmenes hacen referencia al “balance adecuado para tratar los contaminantes y sedimentos transportados por la escorrentía en eventos de lluvia de baja magnitud”. (CIIA & EAAB, 2017, p.103). Por otro lado, para las estructuras que retienen y almacenan aguas lluvias, se requiere de una valoración de caudales para un periodo de retorno determinado y unas intensidades de lluvias correspondiente, aplicando el método racional.

Para la obtención de los parámetros hidrológicos, que son útiles como insumos para el dimensionamiento de las tipologías seleccionadas en el diseño conceptual. Se toman los datos técnicos brindados por la Empresa de Acueducto de Bogotá (EAAB), la cual suministró el valor de los coeficientes para la ecuación de las curvas IDF en la Carrera 9 con Calle 110 condensados en la Tabla 11. La intensidad de lluvia se determina con la Ecuación 1 indicada en la NS - 085 p.7.

Id	Punto (E,N) EPSG3116	Tiempo de retorno 3 años			Tiempo de retorno 5 años			Tiempo de retorno 10 años			Tiempo de retorno 25 años			Tiempo de retorno 50 años			Tiempo de retorno 100 años		
		C1	Xo	C2	C1	Xo	C2	C1	Xo	C2	C1	Xo	C2	C1	Xo	C2	C1	Xo	C2
0	1004417,1010456	4754.17	29.2	-1.07828	5224.54	29.5	-1.07163	5627.25	28.9	-1.06115	5806.63	27.5	-1.04086	6559.80	28.3	-1.04361	6741.67	27.7	-1.03257

Tabla 11. Coeficientes para ecuación de curvas IDF de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

Fuente: (EAAB, 2021)

$$INTENSIDAD = C_1(DURACIÓN + X_0)^{C_2}$$

Ecuación 1. Fórmula para calcular la intensidad en función de la duración y los coeficientes entregados por la EAAB.

Fuente: (EAAB, 2009).

7.1.1 Curvas intensidad duración frecuencia (IDF)

En la Figura 22 se muestran las curvas IDF para periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años con una duración de evento de 360 minutos. Al hacer una comparación con el Estudio para Análisis y Comparación de Tormentas en la Sabana de Bogotá realizado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), se encuentra que para la zona pluviográfica Z1, la cual enmarca la ubicación del diseño y comprende las estaciones Usaquén Santa Ana, Contador, La Vieja, San Luis, Arrayan San Francisco y El Granizo, se conservan intensidades de lluvia similares a las obtenidas con los datos técnicos suministrados. Cabe aclarar que no se tuvo en cuenta una variación espacial en la estimación de los caudales de diseño.

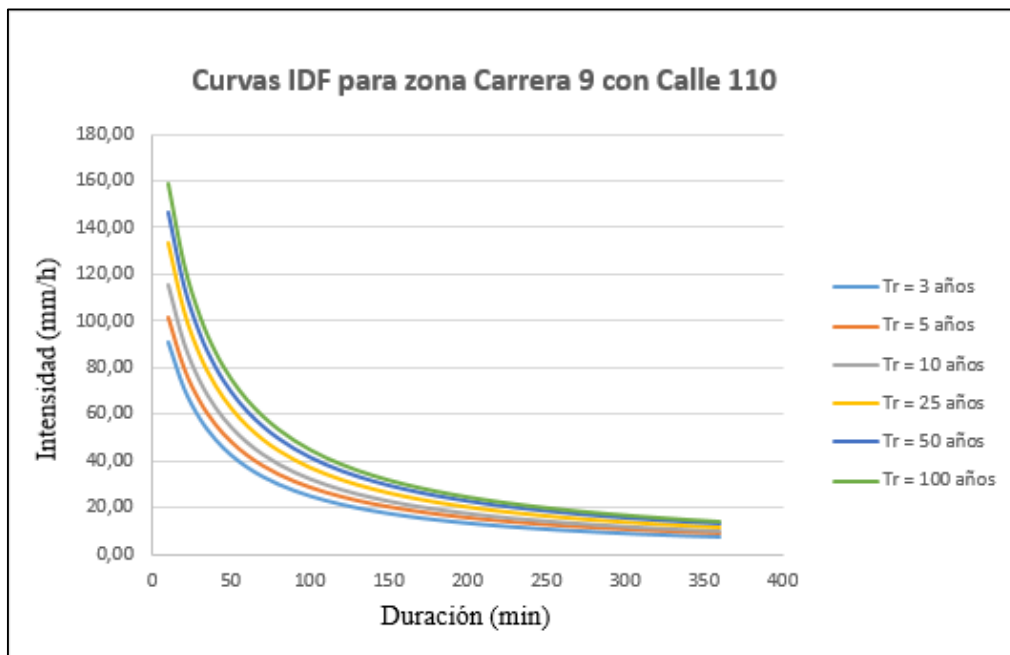


Figura 22. Curvas IDF para área de estudio

Fuente: propia

7.1.2 Hietogramas de precipitación

Aplicando el método de bloques alternos se obtiene la tormenta de diseño para cada periodo de retorno por medio de las curvas IDF, a partir de ello se puede representar la distribución de un evento durante un periodo de tiempo y se determina la profundidad de lluvia (hp) que es útil en el diseño para cuantificar el volumen de tratamiento (Vc), esta lámina de precipitación se encontró que puede variar entre 15 y 26 mm en los periodos de retorno adoptados.

7.2 DISEÑO DE ZANJAS FILTRANTES

Siendo la tipología mejor calificada para el manejo de escorrentía y el tratamiento de contaminantes en las aguas lluvias, se plantean dos zanjas filtrantes en el separador verde de la Estación del tren de la Sabana en el costado izquierdo de la Carrera 9 sentido Sur - Norte, ambas con una infiltración nula haciendo uso de geomembrana y tubería perforada que conduce las aguas lluvias hacia los tanques de atenuación.

Se proponen dos tanques de atenuación para aguas lluvias en celdas modulares Aquacell en el separador verde, los cuales almacenan la escorrentia recolectada y transportada por las zanjas filtrantes, para posteriormente descargarlas de forma controlada a la red de drenaje pluvial moderando los flujos picos y disminuyendo los volúmenes de escorrentía, se plantea que estén cubiertos por una geomembrana impermeable para evitar el ingreso de las aguas subterráneas que disminuirían su capacidad de almacenamiento.

Para las zanjas filtrantes se recomienda un periodo de retorno entre 2 y 3 años, mientras que para los tanques de atenuación se sugiere un periodo de diseño de 25 años, estas recomendaciones son válidas para seleccionar los coeficientes de escorrentia y la profundidad de lluvia.

7.2.1 Áreas de drenaje para trenes en zanja de infiltración

Las áreas de drenaje se componen de una superficie impermeable la cual hace parte de la cobertura asfáltica de la Avenida Carrera 9. Por otro lado, se drenan también zonas verdes que pertenecen al separador de la Estación del Tren Turístico de la Sabana con una cobertura vegetal superior al 75 % de pendientes entre 0 y 2 %. Los trenes de tratamiento en zanjas

filtrantes se ubican entre las Calles 110 y 112 por la Carrera 9 y recolectan la escorrentía que viene en sentido Norte - Sur conectando con un tanque de retención para aguas lluvias, A continuación, en la

Tabla 12 se encuentran los valores para las áreas de aporte, en la Figura 23 y Figura 24 se observan en planta las áreas de drenaje y potenciales donde se ubicarían las tipologías.

Número de tipología / Superficie (m ²)	Primera zanja filtrante	Segunda zanja filtrante
Asfalto	340.57	539.51
Cobertura vegetal	818.95	720.78
TOTAL	1159.52	1260.29

Tabla 12. Áreas de aporte para zanja filtrante

Fuente: propia



Figura 23. Mapa áreas de drenaje para zona potencial del primer tren en zanja filtrante que conecta con primer tanque de atenuación para aguas lluvias.

Fuente: (propia, adaptada de Mapas Bogotá)

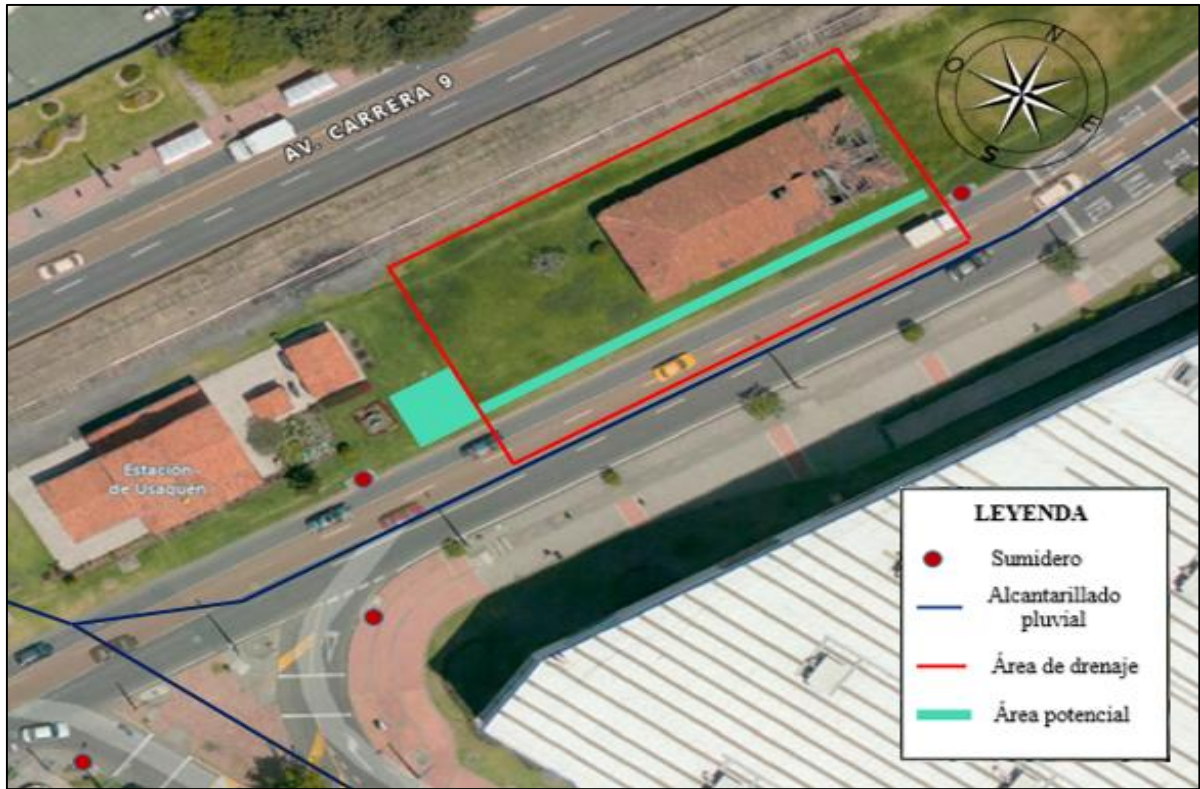


Figura 24. Mapa áreas de drenaje para zona potencial del segundo tren en zanja filtrante que conecta con segundo tanque de atenuación

Fuente: (propia, adaptada de Mapas Bogotá)

7.2.2 Coeficientes de escorrentía para áreas de drenaje en zanjas de infiltración

Los coeficientes de escorrentía se determinan con base a los aportados por (V Chow, 1998) ya que son más precisos al estar en función de un periodo de retorno, superficie y pendiente del terreno. Aunque la NS-085 recomienda unos valores, se puede diferir mientras esté justificado.

En la Tabla 13, se determina un coeficiente de escorrentía ponderado ya que se incluyen sub áreas con coeficientes diferentes.

Número de tipología	Primer tren zanja de infiltración	Segundo tren zanja de infiltración
Coefficiente de Escorrentia		
Asfalto	0.73	0.73
Cobertura vegetal superior al 75 % pendiente baja (0 - 2 %)	0.21	0.21
PROMEDIO PONDERADO	0.36	0.43

Tabla 13. Coeficientes de escorrentía para áreas de aporte zanjias filtrantes

Fuente: propia

7.2.3 Caudal de diseño para zanja filtrante (Qr)

Utilizando los valores de áreas de drenaje, intensidad de lluvia y coeficientes de escorrentía, siguiendo la Ecuación 2 se obtiene en la Tabla 14 el caudal que se espera ingrese a las estructuras.

$$Qr = C_i * I * A_{Ali}$$

Ecuación 2. Caudal de aporte por método racional

Variables Tipología	Área de drenaje A_{Ali} (m ²)	Coefficiente de escorrentia ponderado C_i	Intensidad de lluvia I (mm/h)	Caudal Q_r (m ³ /s)
Primer tren zanja filtrante	1159.52	0.36	91.01	0.010
Segundo tren zanja filtrante	1260.29	0.43	91.01	0.014

Tabla 14. Caudales de diseño para cada zanja filtrante

Fuente: propia

A continuación, se hace el dimensionamiento de las zanjias filtrantes siguiendo las restricciones y parámetros aconsejados por la NS-166 de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). (Ver Anexo 11.3).

7.2.4 Dimensionamiento de zanjas de infiltración

Para el dimensionamiento de las zanjas de infiltración se toma el método expuesto en “The SUDS Manual”, el cual considera calcular los caudales de escorrentía en sus áreas de recolección o aporte por el método racional, posterior a ello, verificar que la sección supuesta o adoptada cumpla con este caudal de diseño. A continuación, se muestra el proceso de diseño para el primer dren filtrante, en la Tabla 15 se ubican las dimensiones y características propuestas:

1) CARACTERISTICAS PROPUESTAS PARA EL DREN FILTRANTE		
Parámetro	Valor	Unidades
Longitud (L)	58	m
Profundidad (d)	0.40	m
Ancho (W)	0.70	m
Porosidad del agregado (n)	0.40	adimensional
Pendiente (S)	0.008	m/m
Permeabilidad del agregado (k)	0.0005	m/s

Tabla 15. Características y dimensiones propuestas para el primer dren filtrante.

Fuente: propia.

Teniendo los caudales de escorrentía determinados anteriormente (Ver Tabla 14), ahora en la Tabla 16 se determina el caudal que puede fluir por el medio filtrante del dren y se espera sea captado por la tubería perforada utilizando la Ecuación 3, el gradiente hidráulico de acuerdo a la literatura de guía se recomienda de 1 para flujo vertical en distancias cortas.

$$Q = A * k * i$$

Ecuación 3. Ley de Darcy

2) CÁLCULO CAUDAL EN MEDIO FILTRANTE		
Parámetro	Valor	Unidades
Área de flujo transversal (A)	23.2	m ²
Permeabilidad del agregado (k)	0.0005	m
Gradiente hidráulico (i)	1	m/m
Capacidad de flujo (Q)	0.0116	m ³ /s

Tabla 16. Cálculo capacidad de flujo en zanja filtrante

Fuente: propia

Comparando la capacidad de flujo junto con el caudal de escorrentía, se encuentra que este primero es mayor y por lo tanto la sección del dren filtrante puede tener estas dimensiones. En la Tabla 17, se dimensiona la tubería de drenaje que recolecta las aguas lluvias que ingresan a la zanja y son transportadas al tanque de atenuación, se recomienda asumir un diámetro entre 4 - 8 pulgadas.

3) DIMENSIONAMIENTO DE LA TUBERIA POR COLEBROOK-WHITE		
Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro asumido (Do)	6	in
Rugosidad de la tubería (Cw)	150	adimensional
Pendiente de la tubería (Sw)	0.008	m/m
Capacidad drenante de la tubería (Qd)	0.0218	m ³ /s

Tabla 17. Comprobación capacidad drenante en tubería de drenaje seleccionada

Fuente: propia

Al comparar la capacidad drenante de la tubería perforada con la capacidad de flujo y el caudal de escorrentía, se comprueba que esta primera sea superior a las dos últimas, por tal motivo se adopta que el diámetro de la tubería del dren filtrante sea de seis pulgadas. Cabe recordar que se debe chequear este último valor con el periodo de retorno adoptado para el tanque de atenuación. Adicional a la zanja filtrante, se propone una estructura de pretratamiento que permita mayores periodos de mantenimiento de la tipología y ayude a evitar la colmatación

del medio filtrante, es por ello que se plantea una franja filtrante de 1.20 m de material vegetal que retenga parte de los sedimentos y permita una descarga controlada de la escorrentía al dren. Entre otras consideraciones del diseño se recomienda en la NS-166 un borde libre mínimo de 30 cm de material granular para eventos superiores al periodo de diseño, en la parte inferior de este es recomendable instalar un geotextil u otra capa de arena para hacer una retención de sedimento, en cuanto al reservorio se sugiere utilizar grava con la especificación AASHTO #3 o #57 y una relación de vacíos entre 30-40 % que permita el movimiento y la entrada de las aguas lluvias a la estructura. En la Figura 25, se muestra un corte de la zanja donde se muestra su sección transversal y las estructuras de entrada y pretratamiento como bordillos perforados y franjas vegetadas de filtración:

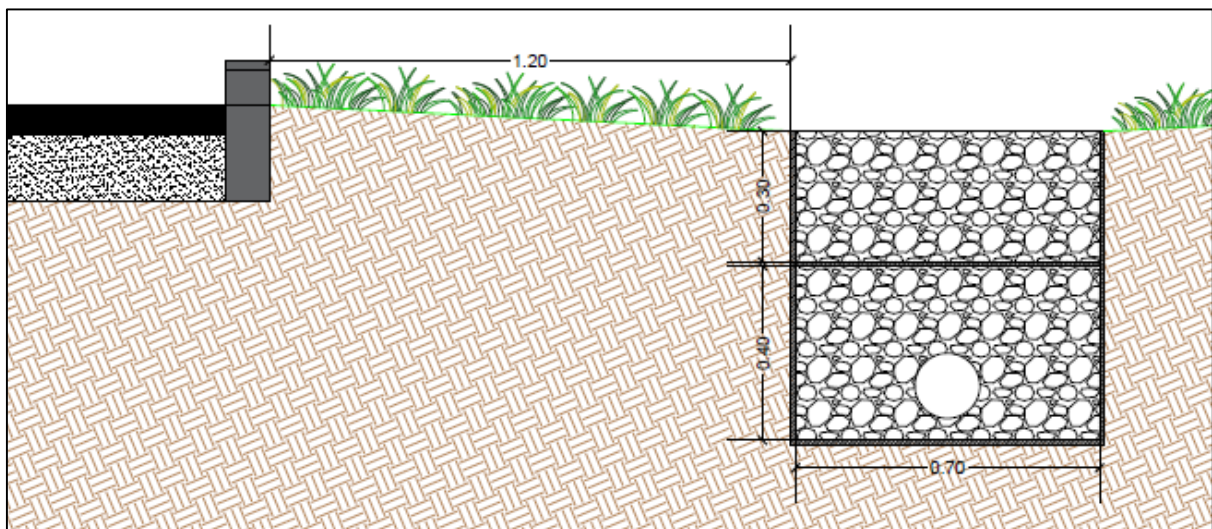


Figura 25. Plano corte sección transversal en la primera zanja filtrante

Fuente: propia

Se considera también al final de la zanja una caja de inspección como la que se observa en la

Figura 26, que sea útil para chequear la reducción de los contaminantes en las aguas lluvias captadas, como también para conectar esta tipología con el tanque de atenuación y permitir labores de limpieza y mantenimiento.

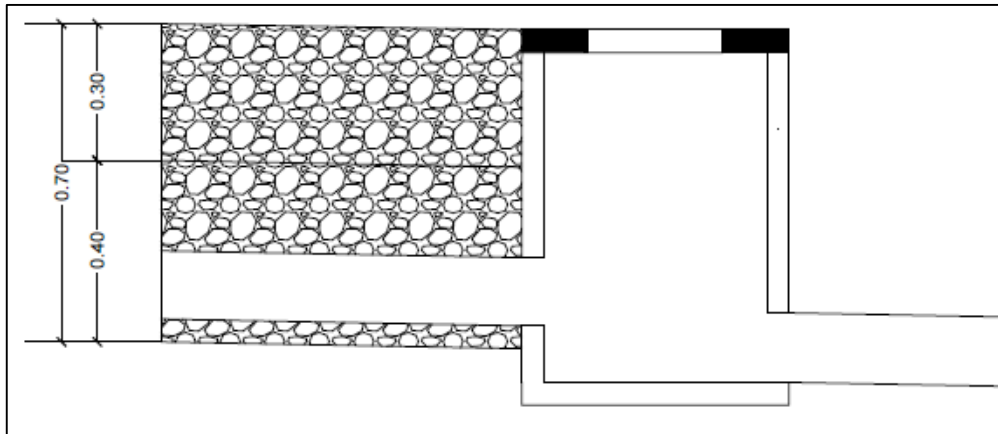


Figura 26. Caja de inspección en zanja filtrante que conecta la tipología con el tanque de atenuación.

Fuente: propia.

7.3 DISEÑO DE TANQUES DE ATENUACIÓN

Se plantean para retener por un tiempo las aguas lluvias y sean descargadas de forma controlada a la red de alcantarillado, la captación y conducción de estos volúmenes de agua se propone sea por medio de un dren francés o zanja filtrante diseñada anteriormente. Para el diseño de esta estructura se decide adoptar un periodo de retorno de 25 años, como material de la estructura se propone sea módulos de plástico Aquacell con un volumen de almacenamiento del 95 % respecto a su capacidad total, se adopta este material al ser liviano y ya que permite una mayor facilidad de instalación. El dimensionamiento de esta tipología se desarrolla por el método del tiempo pico.

7.3.1 Áreas de drenaje para tanques de atenuación

El área que se espera drenar es la misma propuesta para las zanjas de infiltración dimensionadas previamente. (Ver

Tabla 12)

7.3.2 Coeficientes de escorrentía para tanques de atenuación

Si bien las áreas de aporte son las mismas identificadas para las zanjas filtrantes, de acuerdo a Suárez (2001) y Chow et al (1998) se propone usar valores para el coeficiente de escorrentia que no solo tomen en cuenta el tipo y uso del suelo, sino tambien el periodo de

retorno y la pendiente del terreno. Se adoptan coeficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 25 años en la determinación de los caudales de escorrentia para el dimensionamiento de los tanques de atenuación, el ponderado se puede observar en la Tabla 18. En el Anexo 11.16 se puede encontrar las tablas con los valores del coeficiente de escorrentia que se utilizaron como guía.

Número de tipología / Coeficiente de Escorrentia	Primer tren zanja de infiltración	Segundo tren zanja de infiltración
Asfalto	0.86	0.86
Cobertura vegetal superior al 75 % pendiente baja (0 - 2 %)	0.29	0.29
PROMEDIO PONDERADO	0.47	0.53

Tabla 18. Coeficientes de escorrentia en áreas de aporte para un periodo de retorno de 25 años

Fuente: propia.

Las consideraciones de acuerdo a la NS-166 de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), para el diseño de este tipo de tanques, solo se concentran en dos parámetros, la pendiente y el nivel freático que se muestran en el Anexo 11.6.

7.3.3 Dimensionamiento tanque de almacenamiento

Para el dimensionamiento de los tanques de atenuación, se necesita conocer el tiempo pico de la tormenta, para esto es necesario determinar inicialmente el tiempo de concentración en la UGA 043 que se obtiene a partir de parámetros como área, longitud y pendiente de esta misma. En la Tabla 19, se muestran las características físicas de la UGA 043, el procedimiento para el dimensionamiento en el primer depósito de atenuación se muestra a continuación.

1) INSUMOS		
Parámetro	Valor	Unidad
Área de la cuenca (Ac)	0.725	km ²
Longitud cuenca (Lc)	1.74	km
Pendiente	0.0787	m/m

Tabla 19. Características físicas de la UGA 043

Fuente: propia

A partir de los datos de la Tabla 19, se determina un tiempo de concentración (T_c) de 0.27 horas, como también un tiempo de retardo (T_r) de 0.16 horas y una duración de lluvia exceso de 1.04 horas. Según lo anterior, en la Tabla 20 se obtiene un tiempo pico de 0.68 horas con el cual se dimensiona el volumen del tanque.

2. CALCULO DE TIEMPO PICO		
Parámetro	Valor	Unidad
Tiempo de concentración (Tc)	0.27	Horas
Tiempo de retardo (Tr)	0.16	Horas
Tiempo duración lluvia exceso (Dexc)	1.04	Horas
Tiempo pico (Tp)	0.68	Horas

Tabla 20. Cálculo de tiempo pico en tormenta

Fuente: propia

A continuación, en la Tabla 21 se determina el caudal de escorrentía en este tiempo pico por medio del método racional teniendo en cuenta las áreas de aporte para el tanque, la intensidad de lluvia acorde al periodo de retorno escogido y los coeficientes de escorrentía promedios calculados en la Tabla 18.

3. CALCULO CAUDAL PICO		
Parámetro	Valor	Unidad
Área de aporte (A)	1159	m ²
Intensidad de lluvia (I)	133.53	mm/h
Coefficiente de escorrentia promedio (C)	0.47	Adimensional
Caudal pico (Qp)	20.21	L/s

Tabla 21. Cálculo caudal pico en área de aporte para tanque de atenuación

Fuente: propia

El volumen de almacenamiento para el tanque, se determina a partir de un balance de masas y para ello se construye un hidrograma SCS a partir del tiempo y caudal pico, se define un caudal de salida que no debe ser superior al máximo de entrada y se debe elegir teniendo en cuenta también que no afecte las condiciones hidráulicas de la red aguas abajo. En este caso, se adoptó un caudal de descarga de 5 L/s el cual se puede asegurar haciendo uso de válvulas reguladoras de flujo Vortex, en el Anexo 11.7 se muestra el cálculo del volumen para el primer tanque de atenuación.

En la Figura 27, se muestra de forma gráfica el balance de masas para el primer tanque de atenuación donde se observa que desde el minuto 15 el caudal de entrada supera al caudal de descarga y es allí cuando empieza a llenarse el tanque hasta alcanzar un caudal máximo de entrada de 20.2 L/s cerca a los 40 minutos del evento, a partir de aquí, el tanque empieza a vaciarse haciendo una descarga controlada a la red de alcantarillado pluvial quedando completamente vacío a los 90 minutos. Durante el intervalo de 15 - 40 minutos de la precipitación el tanque puede recibir hasta 3 m³ cada 4 minutos, este volumen de entrada se reduce una vez alcanzado el tiempo pico para obtener al final un almacenamiento total de 34.7 m³.

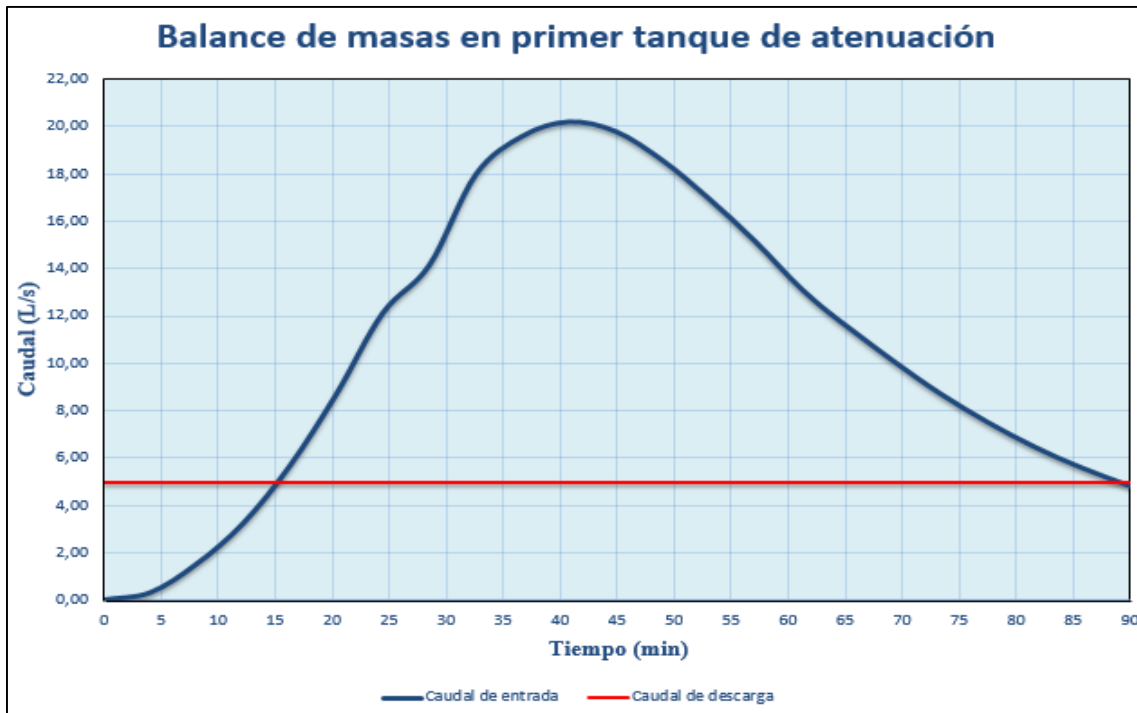


Figura 27. Balance de masas en primer tanque de atenuación propuesto

Fuente: propia

Como se dijo anteriormente, a partir del balance de masas, se obtiene que la estructura debe tener un volumen tal que pueda almacenar 34.70 m^3 de aguas lluvias, suponiendo que se utilizan dos capas de Aquacell se determina la altura y área necesaria del depósito, así mismo la cantidad de estas celdas requeridas para la construcción del tanque en la Tabla 22.

4. CARACTERÍSTICAS DEL TANQUE		
Parámetro	Valor	Unidad
Volumen de almacenamiento requerido	34.68	m ³
Volumen bruto estructura	37.14	m ³
Volumen neto de agua	35.34	m ³
Área de almacenamiento	47.6	m ²
Número de capas de AQUACELL	2	un
Alto	0.78	m
Largo	6.90	m
Ancho	6.90	m
Cantidad de celdas AQUACELL	191	un

Tabla 22. Dimensiones y características para primer tanque de atenuación

Fuente: propia

En la Figura 28, se muestra un corte de sección para el primer tanque de atenuación, en él se observa la conexión con la zanja filtrante por medio de una caja de inspección, la salida del tanque se conectaría a un pozo que transporta las aguas lluvias a la red de alcantarillado pluvial existente de 28 pulgadas por medio de una tubería de 6 pulgadas y pendiente de 1.5%.

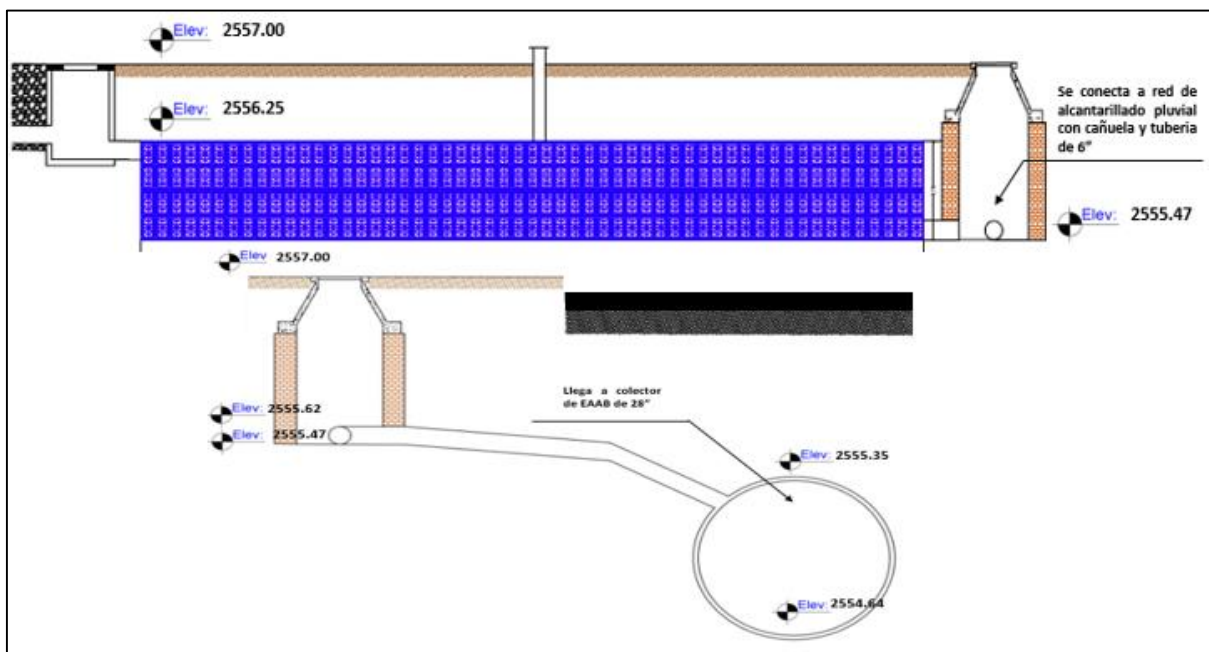


Figura 28. Corte de sección para primer tanque de atenuación

Fuente: propia

7.4 DISEÑO DE PAVIMENTO PERMEABLE

Aprovechando el tramo de la ciclovía que se encuentra en la acera del costado derecho en la Avenida Carrera 9 entre Calles 110 y 112, se plantea un reemplazo de su cobertura asfáltica impermeable, por una que permita el paso y tratamiento de las aguas lluvias junto a un almacenamiento temporal en su reservorio, brindar una descarga controlada a la red de alcantarillado, y brindar al Centro Comercial Santa Ana una posibilidad a futuro de aprovechamiento y reutilización de estas aguas lluvias para otras actividades. Se plantea una infiltración nula y el uso de geomembranas en la parte inferior del reservorio.

7.4.1 Áreas de drenaje para pavimentos permeables

El área de drenaje se compone de una superficie impermeable correspondiente al andén del Centro Comercial Santa Ana el cual tiene una cobertura adoquinada y en baldosas de concreto, igualmente se identifican áreas permeables de cobertura vegetal pertenecientes a los jardines y zonas verdes del centro comercial. En la Tabla 23, se muestran las áreas de aporte para cada superficie, en la Figura 29 una vista en planta con las zonas potenciales planteadas para la ubicación de la tipología y las correspondientes áreas de aporte.

Tipología Superficie (m ²)	Pavimento permeable
Asfalto	289.2
Cemento	825.54
Adoquinada	49.97
Cobertura vegetal superior al 75 % pendiente media (2 - 7 %)	719.62
TOTAL	1884.33

Tabla 23. Áreas de drenaje para pavimentos permeables

Fuente: propia



Figura 29. Mapa áreas de drenaje para zona potencial de pavimento permeable

Fuente: propia, modificada de Mapas Bogotá.

7.4.2 Coeficientes de escorrentía para pavimentos permeables

Para la cobertura asfáltica se señala un valor de 0.86, para las baldosas en concreto que componen la acera se asigna un valor de 0.88, en superficies adoquinadas 0.75, por último, en la zona permeable correspondiente a áreas verdes de los jardines que hacen parte del centro comercial Santa Ana, se sugiere un valor de 0.39. Estos valores mostrados en la Tabla 24, fueron asignados teniendo en cuenta un periodo de retorno de 25 años.

Tipología	Pavimento permeable
Asfalto	0.86
Cemento	0.88
Adoquinada	0.75
Cobertura vegetal superior al 75 % pendiente media (2 - 7 %)	0.39
PROMEDIO PONDERADO	0.68

Tabla 24. Coeficientes de escorrentía para áreas de aporte a pavimento permeable

Fuente: propia

7.4.3 Volumen de calidad (Vc) para pavimentos permeables

Con una altura de lámina de lluvia (hp) para una precipitación con periodo de retorno de 25 años, utilizando los valores de áreas de drenaje y el coeficiente de escorrentía ponderado, se obtiene en la Tabla 25 el volumen de calidad por medio de la Ecuación 4.

$$Vc = hp * C_i * A_{Ali}$$

Ecuación 4. Volumen de calidad

Variables Tipología	Área de drenaje A_{ALI} (m ²)	Coefficiente de escorrentía ponderado Ci	Profundidad de lluvia hp (mm)	Volumen de Tratamiento Vc (m ³)
Pavimento permeable	1884.33	0.68	22.25	28.5

Tabla 25. Volúmenes de tratamiento para pavimento permeable

Fuente: propia.

En el Anexo 11.8, se presentan las restricciones y los parámetros de diseño establecidos en la NS - 166 de la Empresa de Acueducto de Bogotá y sobre los cuales se plantea el diseño.

7.4.4 Dimensionamiento de pavimentos permeables

Para el dimensionamiento del pavimento permeable propuesto, se toman las consideraciones presentadas en la NS-166 y la metodología adaptada del Urban Drainage and Flood Control District de Denver. En primer lugar, es necesario aclarar el tipo de infiltración que se quiere manejar, en este caso se propone que sea nula debido a la distancia al nivel freático y para evitar efectos adversos en la cimentación del centro comercial Santa Ana. Por otro lado, para el material de la rodadura se plantea que sea un asfalto poroso con el fin de no generar molestias en los ciclistas que transitan y ofrecer un adecuado drenaje que evite deslizamientos y derrapes.

Otra de las consideraciones a tener en cuenta en el diseño de los pavimentos permeables, es la categoría del tráfico y el CBR de la subrasante. Tomando como referencia a Ballard W y “The SUDS Manual”, de acuerdo a la BS 7533 se puede clasificar el tráfico en la categoría 2 el cual no recibe tránsito de vehículos livianos y pesados, como también su aplicación está típicamente relacionada con peatones y ciclistas. Por otro lado, para el valor del

CBR de la subrasante teniendo en cuenta los suelos presentes clasificados como limos arcillosos se puede adoptar un valor de 3%. Lo anterior, es determinante para definir en la Tabla 26 un diseño estructural de las capas y hacer una comparación con el diseño hidráulico más adelante.

Categoría de tráfico	Asfalto poroso	Base	Sub-base
2	70 mm	-	150 mm

Tabla 26. Espesor en capa de rodadura y sub-base en asfaltos porosos para tráfico categoría 2

Fuente: (CIRIA,2015)

Para definir el diseño hidráulico, se toma como orientación la “Guía de Diseño Técnico para SUDS” del Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), la cual indica que se debe establecer en primer lugar la relación de la impermeabilidad en el área total, por tal motivo, se toma el área total de aporte junto con el área total que ocupará el pavimento permeable, donde se recomienda que esta última sea al menos un 5 % del área total de drenaje, luego se calcula la relación tributaria impermeable que se recomienda no ser superior a 2. En la Tabla 27, se muestran las áreas de aporte y del tramo de ciclovía que se plantea sea permeable.

Seguido a esto, se calcula el volumen de almacenamiento en la Tabla 28 para el reservorio de la estructura, teniendo como base una pendiente de reservorio igual a 0 m/m con el fin de no diseñar barreras de flujo lateral que disminuyan la capacidad de almacenamiento en la sub-base, incremente los costos y complejidades en la construcción, se toma una porosidad del material granular en el reservorio de 40 % indicado en la Tabla 27.

Parámetro	Valor	Unidades
Área total de drenaje (Ad)	1884.33	m ²
Área de pavimento permeable (As)	289.2	m ²
Profundidad de reservorio (dcr)	0.25	m
Porosidad (ng)	0.40	-
Pendiente en la base del reservorio (Sf)	0	m/m

Tabla 27. Áreas de drenaje y de pavimento permeable junto características de sub-base

Fuente: propia

Durante este paso se determinó que el espesor de la sub-base adoptado en el diseño estructural de 150 mm es insuficiente puesto que el reservorio no puede almacenar el volumen de cantidad que drena, por esta razón se decide aumentar esta capa a 250 mm en la Tabla 27.

Parámetro	Valor	Unidades
Relación de la impermeabilidad del área total (Rim)	68	%
Relación tributaria impermeable (Rt)	3.81	adimensional
Porcentaje área de pavimento permeable (% As/Ad)	15.35	%
Volumen de reservorio (V)	28.92	m ³
Profundidad lámina de agua (d)	0.22	m
Distancia entre tuberías (b)	1.6	m
Diámetro tubería perforada (Do)	0.10	m

Tabla 28. Cálculo volumen de reservorio o sub-base y altura en lámina de agua

Fuente: propia

En la Tabla 28, se cumple con brindar un valor superior de 5% para la superficie del pavimento permeable con respecto a las áreas de drenaje o aporte, sin embargo, la relación tributaria impermeable (Rt) no cumple con ser inferior a 2 aunque esto no representa un problema debido a que la estructura puede tratar todo el volumen de calidad e inclusive puede

almacenar medio metro cúbico más en caso de precipitaciones que superen el periodo de retorno.

Para la capa de rodadura se adoptó un asfalto permeable donde se debe asegurar que este cuente con una permeabilidad significativamente mayor a la intensidad de lluvia, en lo posible 2500 mm/h en condiciones iniciales y a largo plazo por efecto de colmatación de 250 mm/h, seguido a la capa de rodadura se ubica una capa de nivelación de 10 cm que haga un trabajo de filtración y permita el paso del agua a la capa inferior. En cuanto al reservorio se recomienda un material granular que no sea redondeado, tenga buena durabilidad y resistencia a la humedad cumpliendo de igual forma con las especificaciones de la AASHTO #57 o #67, la capa de drenaje debido a que no se quiere asegurar una infiltración es necesario una membrana impermeable que resista las cargas aplicadas y el punzonamiento. En la Figura 30, se muestra un corte transversal de la estructura donde se observa las distintas capas, junto a una caja de inspección para mantenimiento, limpieza y evacuación de las aguas lluvias recolectadas.

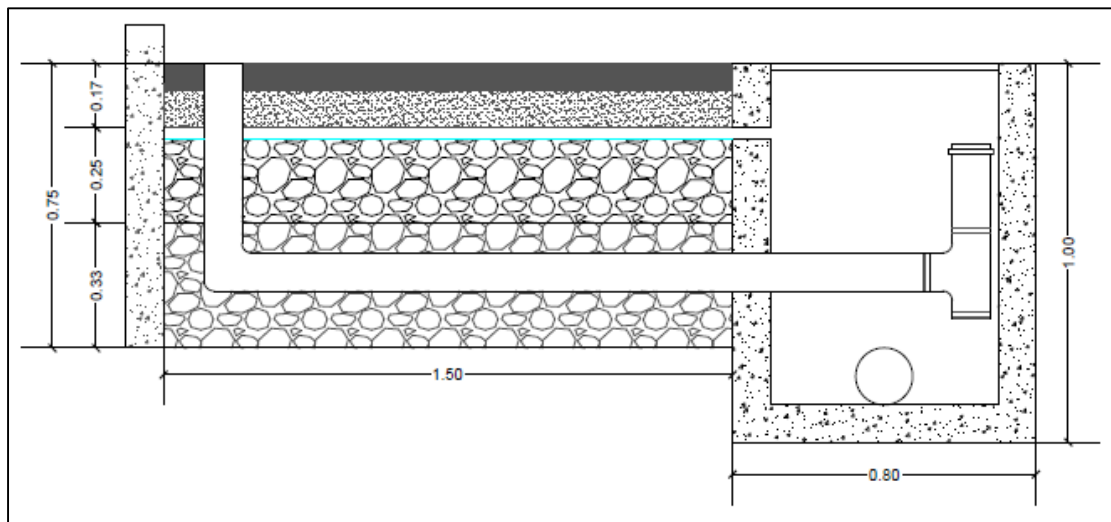


Figura 30. Corte de sección en estructura de pavimento permeable

Fuente: propia

En la Figura 31, se muestra la vista en planta del pavimento permeable donde se observa la tubería perforada con un sifón para limpieza y mantenimiento

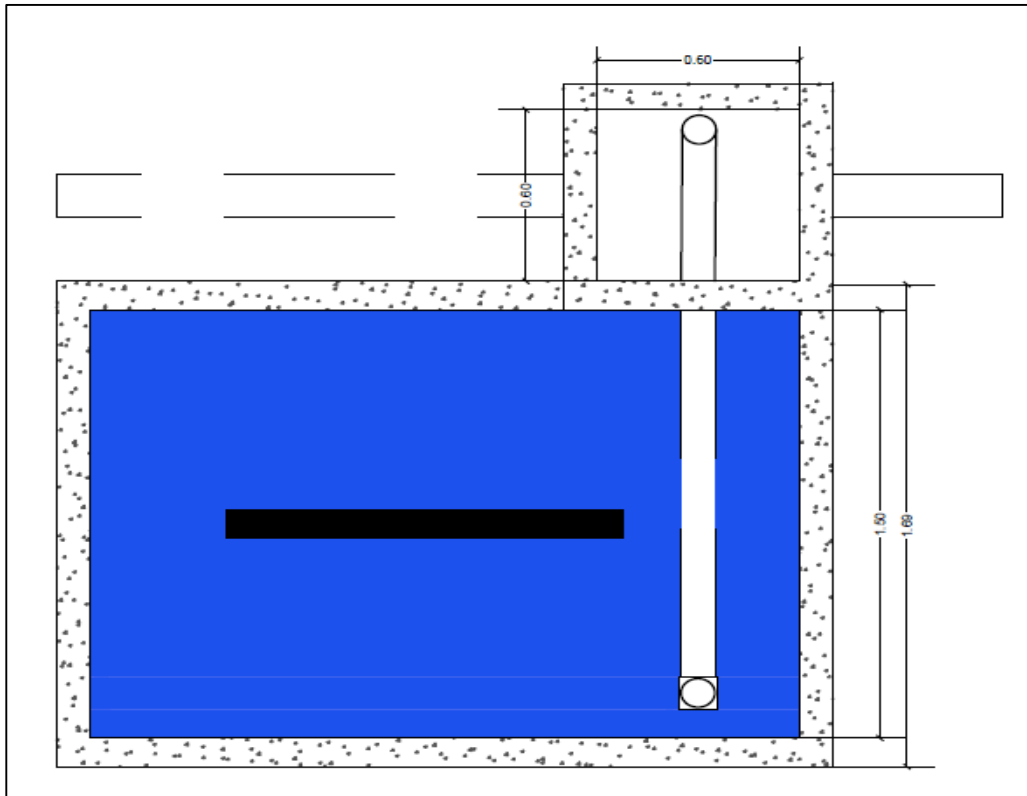


Figura 31. Vista en planta sección de pavimento permeable diseñada.

Fuente: propia

7.5 DISEÑO DE ZONAS DE BIORETENCIÓN

Se determinan las dimensiones de las zonas de bioretención, teniendo en cuenta que estas recolectan parte de la escorrentía que circula por la cobertura asfáltica de la Avenida Carrera 9 en sentido Sur - Norte, se plantean dos tres trenes de tratamiento cuya ubicación está planteada para el andén que se ubica al costado izquierdo de la ciclovia, se proyecta una infiltración parcial así mismo el uso de material granular grueso en su capa de drenaje.

7.5.1 Área de drenaje para primera zona de bioretención

El área de drenaje, se compone únicamente de una superficie impermeable correspondiente a la cobertura de material asfáltico que hace parte de la estructura de la Carrera 9, los dos primeros trenes recolectan la escorrentia que se mueve en sentido Norte - Sur. En la Tabla 29 y Tabla 30 se encuentran las superficies para cada tren, en la Figura 32 y Figura 33 se muestran las zonas potenciales planteadas para la ubicación de la tipología y las correspondientes áreas de aporte.

Primer tren zona de bioretención	Área de aporte (m ²)
1	53.84
2	79.78
3	52.69
4	58.02

Tabla 29. Áreas de aporte para primer tren de tratamiento con zonas de bioretención

Fuente: propia

Segundo tren zona de bioretención	Área de aporte (m ²)
1	76.18
2	69.34
3	296.25
4	108.82

Tabla 30. Áreas de aporte para segundo tren de tratamiento con zonas de bioretención

Fuente: propia



Figura 32. Mapa áreas de drenaje para zona potencial de primer tren en zona de bioretención

Fuente: (propia, adaptada de Mapas Bogotá)

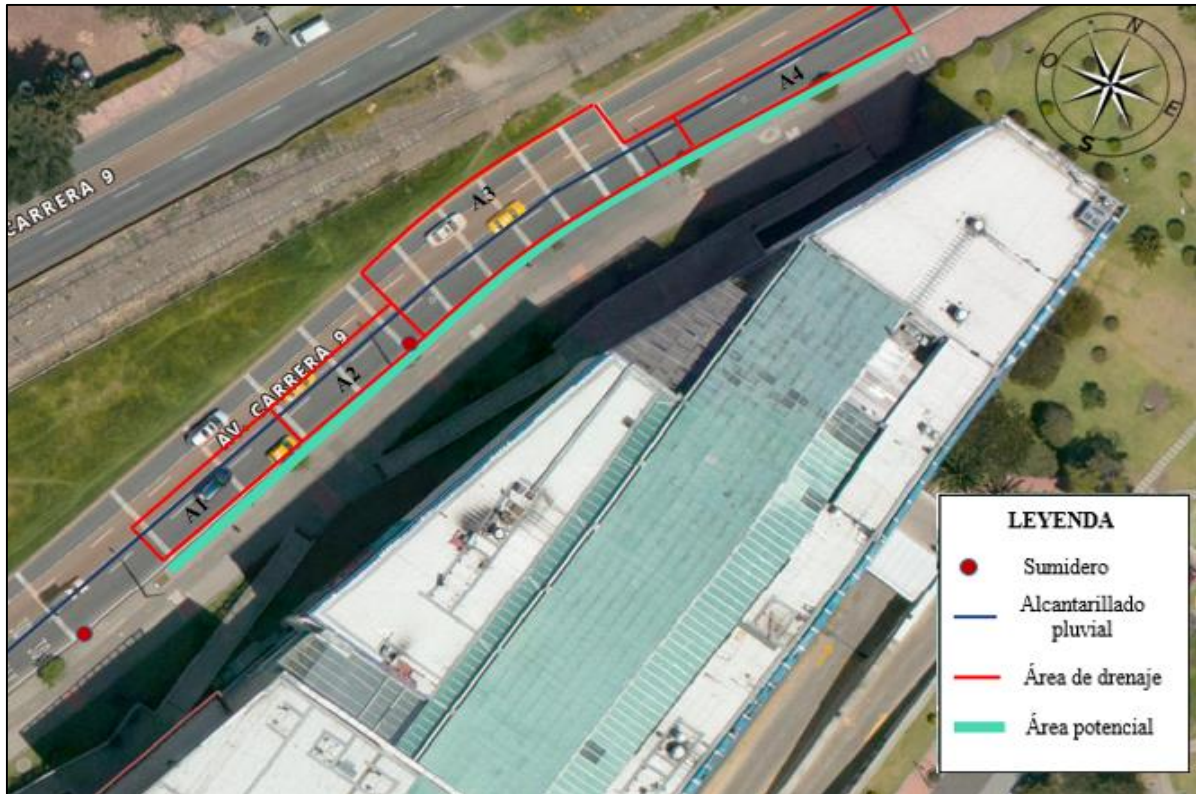


Figura 33. Mapa áreas de drenaje para zona potencial de segundo tren en zona de bioretención

Fuente: (propia, adaptada de Mapas Bogotá)

7.5.2 Coeficientes de escorrentía para áreas de drenaje en segunda zona de bioretención

En la Tabla 31, se adopta un coeficiente de escorrentía de 0.73 que corresponde a la superficie asfáltica

Número de tipología	Primer tren zona de bioretención	Segundo tren zona de bioretención
Coeficiente de Escorrentia		
Asfalto	0.73	0.73
PROMEDIO PONDERADO	0.73	0.73

Tabla 31. Coeficientes de escorrentía para áreas de aporte a zonas de bioretención

Fuente: propia

7.5.3. Volumen de calidad (Vc) para zonas de bioretención

Con la altura de lámina de lluvia (hp) para una precipitación con periodo de retorno de 2 años, utilizando los valores de áreas de drenaje y coeficientes de escorrentía, se obtiene en la Tabla 32 y Tabla 33 los volúmenes de calidad por medio de la Ecuación 5.

$$Vc = hp * C_i * A_{Aii}$$

Ecuación 5. Volumen de calidad

Primer tren zona de bioretención	Área de drenaje A_{ZB} (m ²)	Coefficiente de escorrentia ponderado C_i	Profundidad de lluvia hp (mm)	Volumen de Tratamiento V_c (m ³)
1	53.84	0.73	15.17	0.60
2	79.78			0.88
3	52.69			0.58
4	58.02			0.64

Tabla 32. Volúmenes de tratamiento para primer tren con zonas de bioretención

Fuente: propia.

Segundo tren zona de bioretención	Área de drenaje A_{ZB} (m ²)	Coefficiente de escorrentia ponderado C_i	Profundidad de lluvia hp (mm)	Volumen de Tratamiento V_c (m ³)
1	76.18	0.73	15.17	0.84
2	69.34			0.77
3	296.25			3.28
4	108.82			1.20

Tabla 33. Volúmenes de tratamiento para segundo tren con zonas de bioretención

Fuente: propia

En el Anexo 11.10, se presentan las restricciones y los parámetros de diseño establecidos en la NS - 166 de la Empresa de Acueducto de Bogotá (EAAB), y sobre los cuales se plantea el diseño para las zonas de bioretención.

7.5.4 Dimensionamiento de las zonas de bioretención

Se definen las características geométricas de las tipologías teniendo en cuenta la profundidad de diseño (d), que debe ser acorde a la vegetación plantada y al volumen que se espera tratar, como también las limitaciones de espacio donde esta propuesta su ubicación. En este caso, se tiene una disposición en la acera de 1.40 m de ancho, tomando como insumo las anteriores variables se determina un área mínima de fondo (Af_{min}), que debe ser acorde para prevenir la colmatación de la capa de drenaje y reducir las frecuencias de mantenimiento. A continuación, se muestra el procedimiento de diseño a manera de ejemplo que se utilizó para el dimensionamiento de la primera zona de bioretención en la región 1, en la Tabla 34 se muestra el cálculo del área mínima de fondo (Af_{min}).

1) Cálculo área mínima de fondo		
Parámetro	Valor	Unidades
Volumen de calidad (Vc)	0.60	m ³
Lámina de encharcamiento (d)	0.15	m
Área mínima de fondo (Af min)	2.64	m ²
Área de fondo adoptada (Af)	2.64	m ²
Área superficial (As) \geq (Af)	2.64	m ²

Tabla 34. Cálculo área mínima de fondo para zona de bioretención

Fuente: propia

Con la superficie de fondo mínima obtenida y la profundidad de encharcamiento adoptada de 15 centímetros, no se alcanza a almacenar en la estructura el volumen de calidad de 0.60 m³, en ese caso se pueden seguir dos alternativas, entre las cuales se encuentra aumentar el área de fondo o incrementar la lámina de inundación, al aplicar la primera opción, se acrecienta el volumen de excavación para la tipología de manera considerable, mientras en la segunda este es menor, por tal motivo se adopta esta última y se añaden diez centímetros más para al final conseguir una profundidad de encharcamiento de 0.25 m. En la Tabla 35, se calcula el volumen total (V) el cual debe ser mayor o igual al volumen de calidad (Vc) mostrado en la Tabla 34.

2) Cálculo volumen total		
Parámetro	Valor	Unidades
Volumen total (V)	0.66	m ³

Tabla 35. Cálculo volumen total que puede almacenar la zona de bioretención en su superficie

Fuente: propia

En la Tabla 36 y Tabla 38 se definen las dimensiones de las demás zonas de bioretención, mientras en la Tabla 37 y Tabla 39 se determinan los volúmenes totales, de infiltración y filtración tomando como referencia la porosidad del material granular en la capa de drenaje de 40% y el espesor de esta bajo la tubería perforada de 0.08 m.

Tipologías en primer tren	Ancho zona de bioretención (W _{ZB})	Largo zona de bioretención (L _{ZB})	Lámina de encharcamiento (d)
1	1.20	2.20	0.25
2		3.30	0.25
3		2.20	0.25
4		2.20	0.25

Tabla 36. Dimensiones de zonas de bioretención para primer tren

Fuente: propia

Tipologías en primer tren \ Volúmenes	Volúmenes	Volúmenes	Volúmenes
	Volumen total (m ³)	Volumen infiltrado (m ³)	Volumen filtrado (m ³)
1	0.66	0.084	0.58
2	0.99	0.13	0.86
3	0.66	0.084	0.58
4	0.66	0.084	0.58

Tabla 37. Volúmenes de almacenamiento, infiltración y filtración en zonas de bioretención para primer tren

Fuente: propia

Tipologías en segunda región \ Dimensiones	Dimensiones	Dimensiones	Dimensiones
	Ancho zona de bioretención (W _{ZB})	Largo zona de bioretención (L _{ZB})	Lámina de encharcamiento (d)
1	1.20	3.30	0.25
2		3.30	0.25
3		3.30 ¹	0.30
4		2.20 ²	0.25

Tabla 38. Dimensiones de zonas de bioretención para segundo tren

Fuente: propia

¹⁻². Se hace referencia que en esta área disponible se ubican tres y dos tipologías de las mismas características o dimensiones

Tipologías en segunda región	Volúmenes	Volumen total (m ³)	Volumen infiltrado (m ³)	Volumen filtrado (m ³)
1		0.99	0.13	0.86
2		0.99	0.13	0.86
3		1.19	0.13	1.06
4		0.66	0.084	0.57

Tabla 39. Volúmenes de almacenamiento, infiltración y filtración en zonas de bioretención para segundo tren.

Fuente: propia.

Respecto a las dimensiones de las capas, se tomaron para todas las estructuras las recomendaciones de la NS-166 en el Anexo 11.10. Se debe comprobar, que el área superficial del sustrato pueda tratar las aguas lluvias en un periodo de 12 horas, con el fin de distribuir la escorrentía de manera uniforme en la estructura, asegurar una remoción de contaminantes y preparar la tipología para recibir las aguas de eventos subsecuentes. Para esta comprobación, se toma una permeabilidad del medio filtrante entre 50 y 300 mm/h según lo recomendado por la NS-166, en este caso, se asume un promedio de 175 mm/h que es afectado por un factor de seguridad de acuerdo a (Ballart et al, 2017), puede ser un 50% debido a los posibles efectos de la compactación en la construcción y en este caso por la vibración que generan los vehículos que transitan sobre la Carrera 9, es así que para la verificación del tiempo de drenaje se toma un valor final de 87.50 mm/h. En la Tabla 40, se encuentran los tiempos de tratamiento en el medio filtrante calculados para cada zona de bioretención.

3) Comprobación del diseño	
Zonas de bioretención para la primera región	
Tipología	Tiempo de tratamiento para escorrentía en medio filtrante (h)
1	2.92
2	2.89
3	2.86
4	3.15
Zonas de bioretención para la segunda región	
Tipología	Tiempo de tratamiento para escorrentía en medio filtrante (h)
1	2.76
2	2.51
3	10.00
4	5.51

Tabla 40 .Comprobación del diseño a partir del tiempo de tratamiento en medio filtrante o sustrato

Fuente: propia.

Como se observa en la Tabla 40, todas las tipologías presentan un tiempo de drenaje inferior a 12 horas, lo cual las hace aptas para recibir varias precipitaciones en un solo día.

La vegetación en las zonas de bioretención debe ser considerablemente robusta, con especies nativas para que se adapten mejor al sitio y no requieren de cuidados especiales o un mantenimiento frecuente, así mismo, un volumen alto de vegetación es esencial para la remoción de contaminantes y mejorar la amenidad del lugar. En cuanto a la capa de suelo, debe estar compuesto con una alta proporción de arenas para proporcionar una buena permeabilidad, como también por otra fracción de limo y arcilla para el sustento de las plantas. En la Figura 34, se observa un corte en sección transversal para una zona de bioretención de 1.20 m x 2.20 m y 25 cm de profundidad.

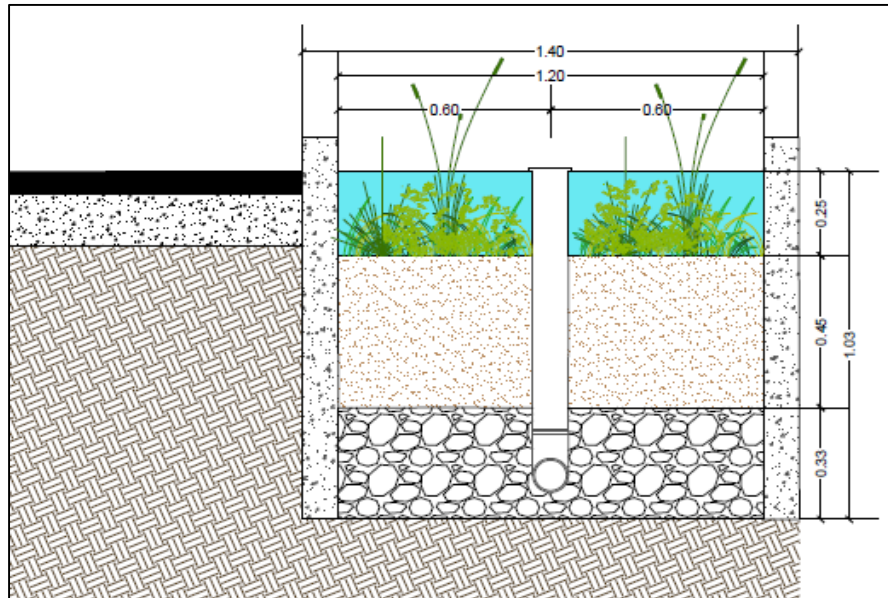


Figura 34. Corte sección transversal en zona de bioretención de 1.20 x 2.20 m

Fuente: propia

Por otro lado, para la capa de drenaje se asigna un agregado con la especificación de la AASHTO #57, en el fondo de este, un geotextil para filtrar las aguas lluvias que se esperan infiltrar al suelo circundante. Para la entrada de las aguas lluvias a las zonas de bioretención, se plantearon vados o depresiones en el borde la vía los cuales de acuerdo a la NS-166 deben ser entre 0.45 cm - 0.60 cm de ancho, esta entrada suele ir elaborada con piedra para disminuir la velocidad de entrada de la escorrentía y evitar así la erosión. En la Figura 35, se observa un corte de sección longitudinal para una zona de bioretención de 1.20 m x 2.20 m.

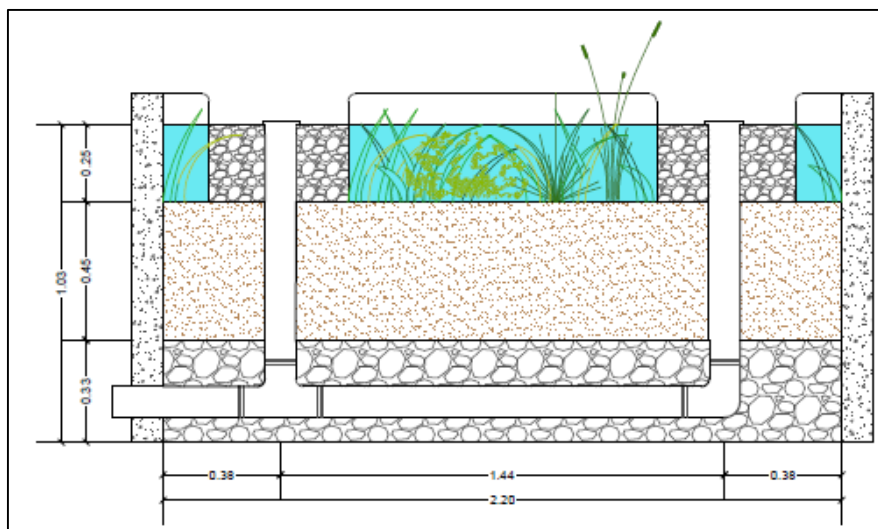


Figura 35. Corte sección longitudinal para zona de bioretención de 1.20 x 2.20 m

Fuente: propia

En cuanto a la tubería de drenaje, se plantea un colector de PVC perforado con una entrada para limpieza y otra para rebose en caso de precipitaciones que sobrepasan la lámina de diseño, esta recoge las aguas lluvias que no se infiltran por completo y son devueltas a la red de alcantarillado, se recomienda en la salida disponer de una caja de inspección para conocer la reducción de contaminantes hecha al interior de la estructura o mantenimiento.

En la Figura 36, se observa una vista en planta para una zona de bioretención de 1.20 m x 2.20 m, allí se visualizan las dos estructuras de entrada, y la tubería perforada que recorre la estructura.

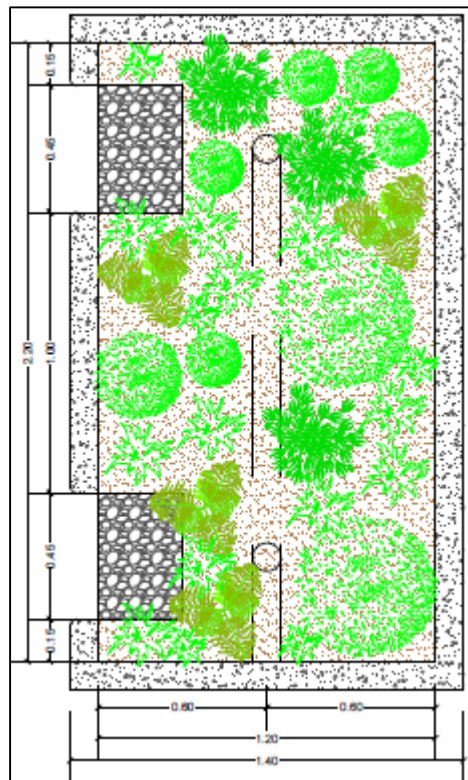


Figura 36. Vista en planta para zona de bioretención de 1.20 x 2.20 m

Fuente: propia

8. MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA

8.1 SIMULACIÓN DE PRECIPITACIÓN

Con el fin de evaluar los aportes de las tipologías anteriormente diseñadas en su contribución a un manejo integral de las aguas lluvias en el sector, y en concordancia con la NS-165 de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), se realiza una modelación hidrológica e hidráulica en el software Storm Water Management Model (SWMM) versión 5.1. A partir de dicho programa, se puede conocer la esorrentía superficial en las áreas de aporte, identificar la capacidad hidráulica de los colectores, el comportamiento de los pozos en un evento, distinguir tramos donde se necesiten expansión o rehabilitación, como también, ofrece la posibilidad de simular tipologías de drenaje urbano sostenible.

En la modelación hidrológica e hidráulica del lugar fue necesario conocer el inventario de la infraestructura existente, lo cual incluye información relevante respecto a colectores, diámetro, material, longitud, pozos, elevaciones, fotografías aéreas etc. La anterior información está disponible en forma de SIG y fue consultada en la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB).

Para la elaboración del modelo, se seleccionó y recolectó la información de la red pluvial que comprende las áreas entre la Carrera 7 y Carrera 9 y las Calles 108A y 111, por tener una mayor influencia en el sector de estudio, se identificaron las áreas aferentes de las tuberías y sus características físicas. En la Figura 37, se muestra en amarillo la zona modelada de la UGA043 que aparece en rojo.



Figura 37. Red de alcantarillado pluvial en la UGA 043, en amarillo la zona modelada en EPA SWMM

Fuente: propia

Una vez definida las características topológicas de la red de drenaje pluvial y las subcuencas del sector, se procede a ingresar los datos de precipitación por medio de una serie temporal definida mediante un hietograma de diseño elaborado a partir del método de bloques alternos, para simular un evento en periodos de retorno de 3 y 25 años que corresponden no solo al periodo de diseño para las tipologías SUDS seleccionadas sino también al de las estructuras existentes del alcantarillado, se definió una duración de lluvia de seis horas aunque el tiempo de concentración y duración de tormenta en la UGA 043 es inferior. Lo anterior, con el objetivo de simular el caso más indeseable de una precipitación extensa. En la Figura 38 y Figura 39, se muestran los hietogramas de diseño empleados en la simulación:

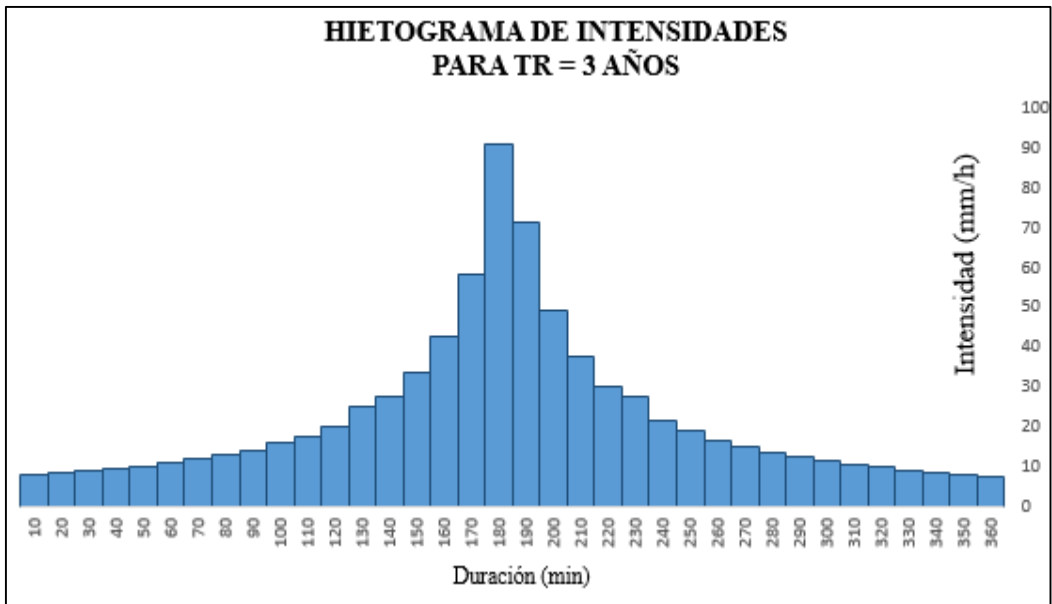


Figura 38. Hietograma de intensidades para un periodo de retorno de 3 años utilizado en la serie temporal

Fuente: propia

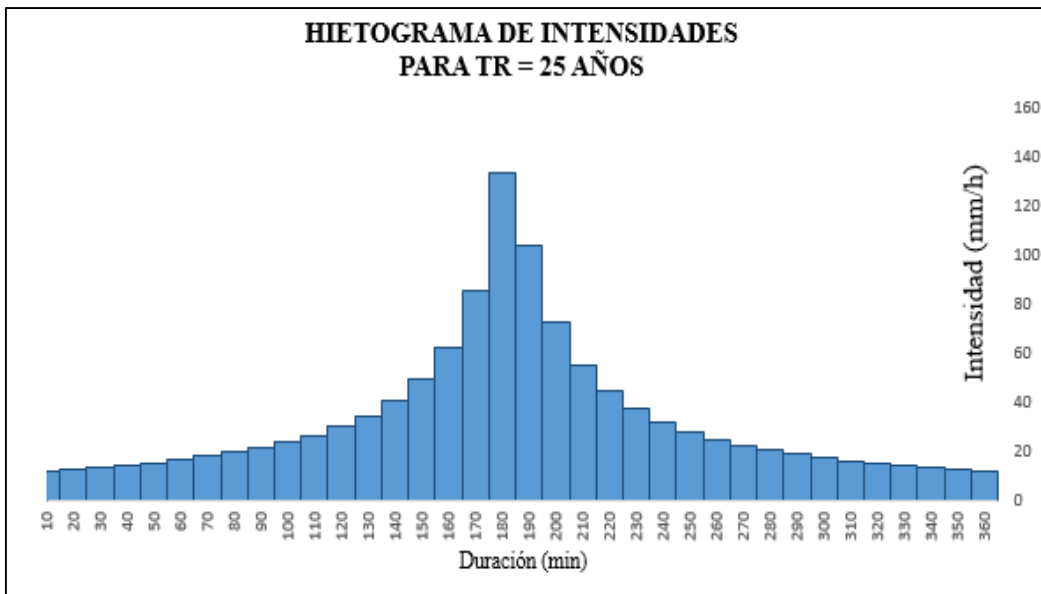


Figura 39. Hietograma de intensidades para un periodo de retorno de 25 años utilizado en la serie temporal

Fuente: propia

8.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En primer lugar, se evalúa en la modelación el comportamiento de la red de alcantarillado pluvial existente en sus condiciones actuales (sin SUDS), donde se observa la

25 años, se determinó que cinco colectores no cumplen con las condiciones óptimas de capacidad.

En la Figura 40, se puede ver que en frente del Centro Comercial Santa Ana en el colector L4 las aguas lluvias son transportadas a flujo lleno y posiblemente se presenta un rebose en dicho punto, lo cual podría explicar las inundaciones sobre la Carrera 9.

8.2.3 Velocidad de flujo

Es recomendable que la velocidad máxima de un colector pluvial que funciona por gravedad no exceda los 5 m/s para su caudal de diseño de acuerdo al Artículo 150 de la Resolución 033 de 2017. %. En la Figura 41, se muestran los tramos modelados con un color distinto dependiendo de la velocidad de flujo, en el Anexo 11.14 se muestra el valor de este parámetro en los colectores para un periodo de retorno de 3 y 25 años.



Figura 41. Velocidad de flujo en colectores en el área simulada para un periodo de retorno de 3 años

Fuente: propia.

Respecto a la velocidad de flujo se encuentra que para un periodo de retorno de 3 y 25 años, un 8% de la red no se cumplen con el valor máximo de 5 m/s, los colectores donde se presentan estos valores se ubican próximos a la salida del sistema.

8.2.4 Inundación

Se determina en la simulación, los puntos donde se presenta un desborde en el sistema de alcantarillado pluvial. Se encontró un pozo donde se presenta este problema a lo largo de la Carrera 9 en frente al Centro Comercial Santa Ana, en el cual el caudal de rebose puede alcanzar valores de 54 L/s y la situación se extiende por un periodo de tiempo entre 35 y 40 minutos. En la Figura 42, se muestra la ubicación del pozo N4 junto con una gráfica del caudal de rebose en función del tiempo.

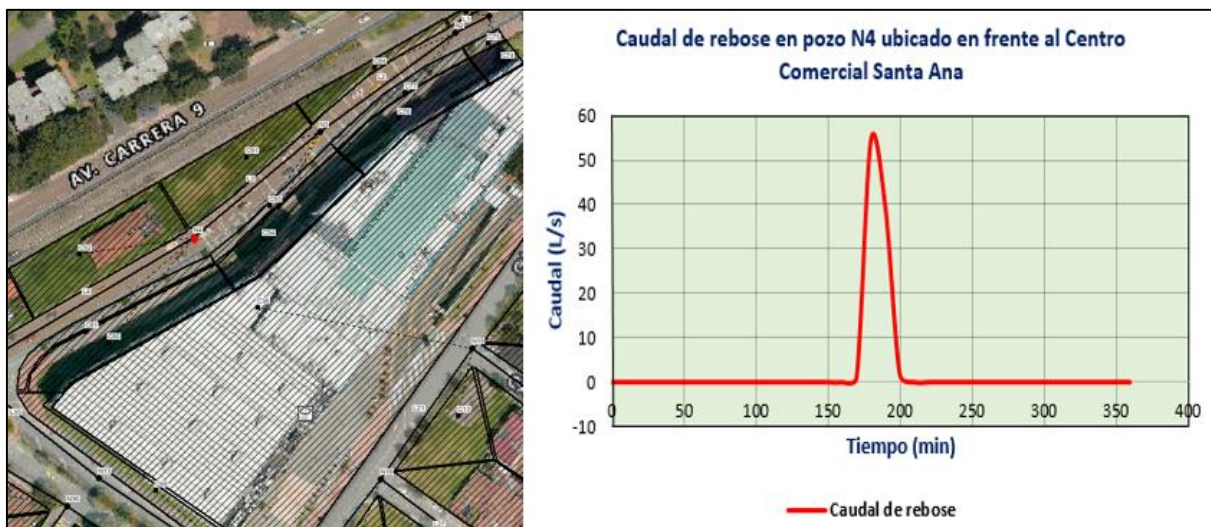


Figura 42. Caudal de rebose que se presenta en el pozo N4 para un periodo de retorno de 3 años

Fuente: propia

En la simulación de las tipologías de drenaje urbano sostenible se va identificar si son suficientes o es posible anular con estas, el desborde que se presenta en el pozo N4.

8.2.5 Caudales de escorrentía

Para la simulación hidrológica se dividió el sitio de estudio en subcuencas, la primera de ellas corresponde al costado oriental de la Carrera 9 entre Calles 110 y 112 que le corresponde espacios como la acera del Centro Comercial Santa Ana, una cicloruta y parte de

la calzada. Por otro lado, la segunda hace parte del costado Occidental del mismo tramo, comprende zonas verdes de la Estación del Tren de Usaquén como también otra fracción de la vía. En la Figura 43, se muestran los caudales de escorrentía que aportan varios costados en el área de estudio.

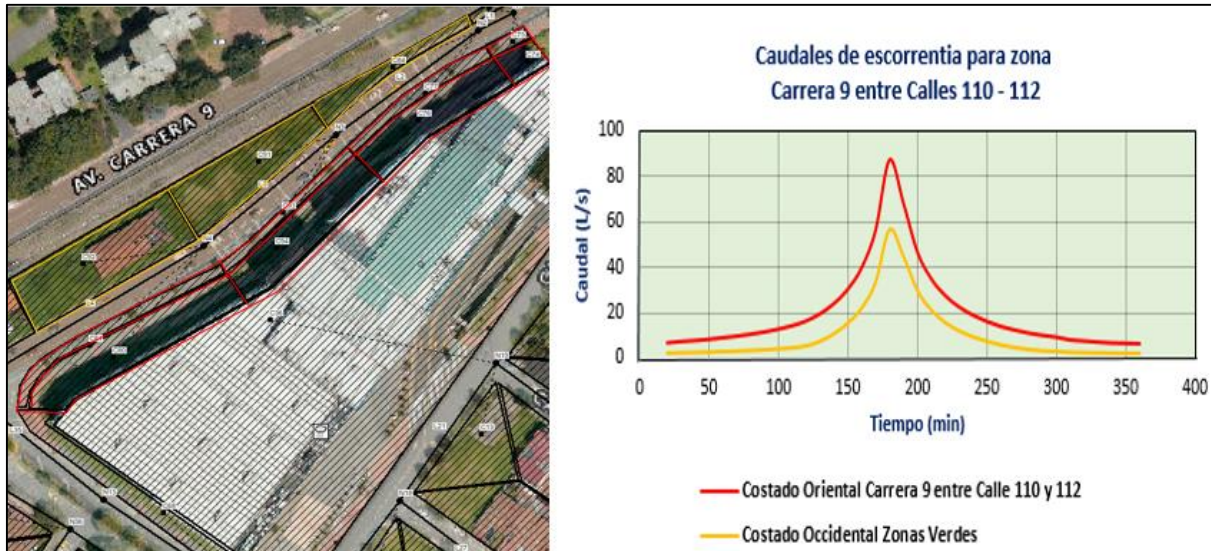


Figura 43. Comparación caudal de escorrentía entre áreas duras y vegetadas que se encuentran en Carrera 9 entre Calles 110 – 112

Fuente: propia

Como se observa en la Figura 43, el costado Oriental al parecer por tener una mayor porción de áreas impermeables se presenta un pico en el caudal de escorrentía de 87.53 L/s, en comparación con su opuesto que llega a los 56.86 L/s a las 3:00 horas del evento.

8.2.6 Perfiles

En la Figura 44, se muestra el perfil de la red de alcantarillado en el tramo de la Carrera 9 entre Calles 110 y 112.

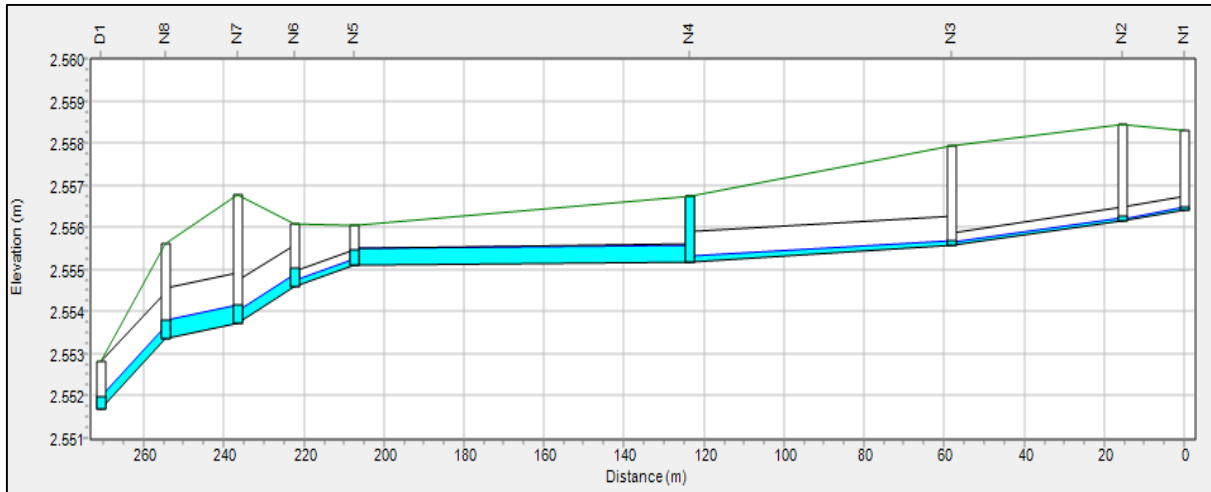


Figura 44. Perfil de alcantarillado pluvial que corresponde al tramo Carrera 9 entre Calles 110 - 112.

Fuente: propia

La Figura 44, representa el tramo de alcantarillado pluvial que se ubica en frente al Centro Comercial Santa Ana por la Carrera 9, se observa que el colector L4 transporta las aguas lluvias a tubo lleno y se presenta un rebose en el pozo N4, lo cual posiblemente puede explicar por qué se inunda el lugar. En la Figura 45, se muestra el perfil de la Carrera 9 entre Calles 108 y 110 donde no se observan problemas de capacidad y rebose en pozos.

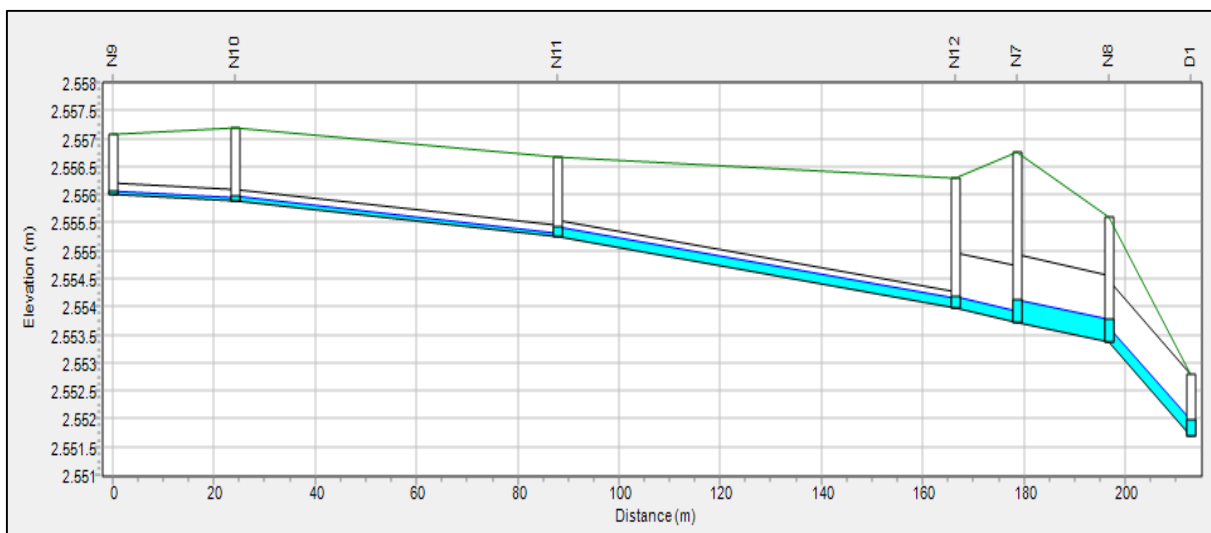


Figura 45. Perfil de alcantarillado pluvial que corresponde al tramo Carrera 9 entre Calles 108 - 110

Fuente: propia

En la Figura 46, se observa el perfil que corresponde a la Calle 110 entre Carrera 7 y Carrera 9, en este se observa el desnivel de las dos avenidas principales y el obstáculo que representa el separador de la Estación del Tren en el flujo natural de la escorrentía.

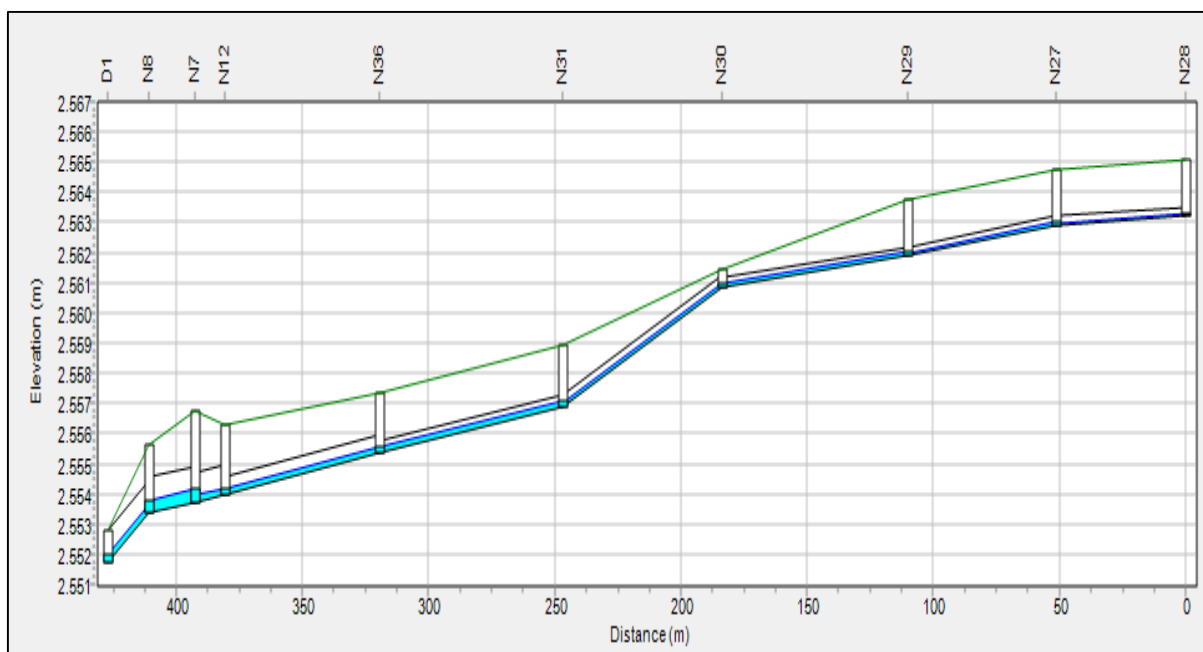


Figura 46. Perfil de alcantarillado pluvial que corresponde a la Calle 110 entre Carrera 7y Carrera 9

Fuente: propia

8.4 MODELACIÓN DE SUDS

Se simula la respuesta y el impacto de las estructuras de drenaje urbano sostenible que se diseñaron anteriormente, en la gestión integral del drenaje pluvial haciendo uso de la herramienta Low Impact Development (LID) mediante el software SWMM 5.1.

Las unidades LID pueden ser representadas como subcuencas aparte o como una fracción de las superficies impermeables de las cuencas definidas, esta herramienta se encuentra separada en capas que describen la estructura interna de la tipología como su superficie, suelo y almacenamiento. En tipologías como pavimentos permeables, se añade la capa de rodadura al modelo, mientras que en zanjas de infiltración se ignora la capa de suelo. (Mogenfelt, 2017)

Por medio de la anterior herramienta, el programa simula el movimiento del agua en forma vertical dentro de la estructura, así mismo, se puede definir las características del drenaje y conocer los procesos y pérdidas por infiltración, percolación y evapotranspiración en la tipología. En la Figura 47, se muestra el modelo conceptual de una estructura típica de drenaje urbano sostenible.

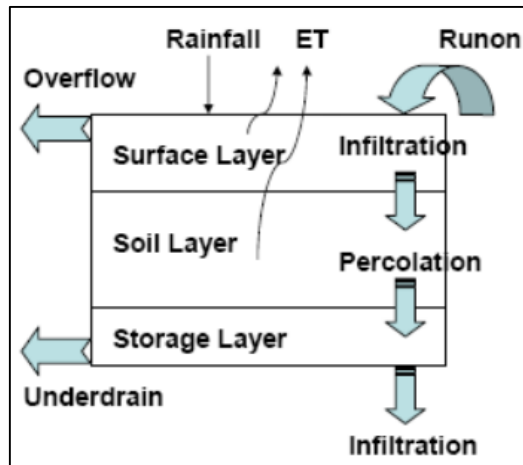


Figura 47. Modelo conceptual Low Impact Development en SWMM 5.1

Fuente: (Rossman, 2010)

En la modelación de las estructuras de drenaje urbano sostenible dimensionadas anteriormente, se asignaron en el software EPA SWMM 5.1 valores para cada una de las capas que componen la estructura de la tipología describiendo distintos parámetros entre los cuales se encuentran las características del sustrato, propiedades en la capa de almacenamiento y las condiciones del drenaje. Los valores consignados se encuentran en el Anexo 11.15, estos fueron tomados siguiendo las dimensiones de las estructuras diseñadas y las características recomendadas para sus materiales de acuerdo a la NS-166.

8.5 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

Definida las tipologías de drenaje urbano sostenible en las subcuencas del sitio de estudio, se empieza a evaluar su contribución en el manejo de las aguas lluvias. En primer lugar, se modelaron las estructuras de pavimento permeable y zonas de bioretención en el área que corresponde al costado oriental de la Carrera 9 entre Calles 110-112, espacio que comprende parte de la calzada y andén del Centro Comercial Santa Ana. En este punto se encontró, que ante un posible reemplazo en la capa de rodadura asfáltica de la ciclovía existente por un material permeable, junto con la disposición de zonas de bioretención que capte parte de las aguas lluvias que fluyen por la avenida, pueden reducir el caudal pico aproximadamente un 33% y retardarlo entre 10 a 15 minutos como se muestra en la Figura 48.

En cuanto a un periodo de retorno de 25 años, se determina que disminuye la capacidad de las tipologías para reducir el caudal pico en la subcuenca, en Figura 49, se registra un valor

máximo en condiciones originales de 131.5 L/s, mientras que con los SUDS planteados este se reduce a 116.02 L/s lo que representa un 12 % aproximadamente, el tiempo de retardo sigue siendo aún de 10 minutos.

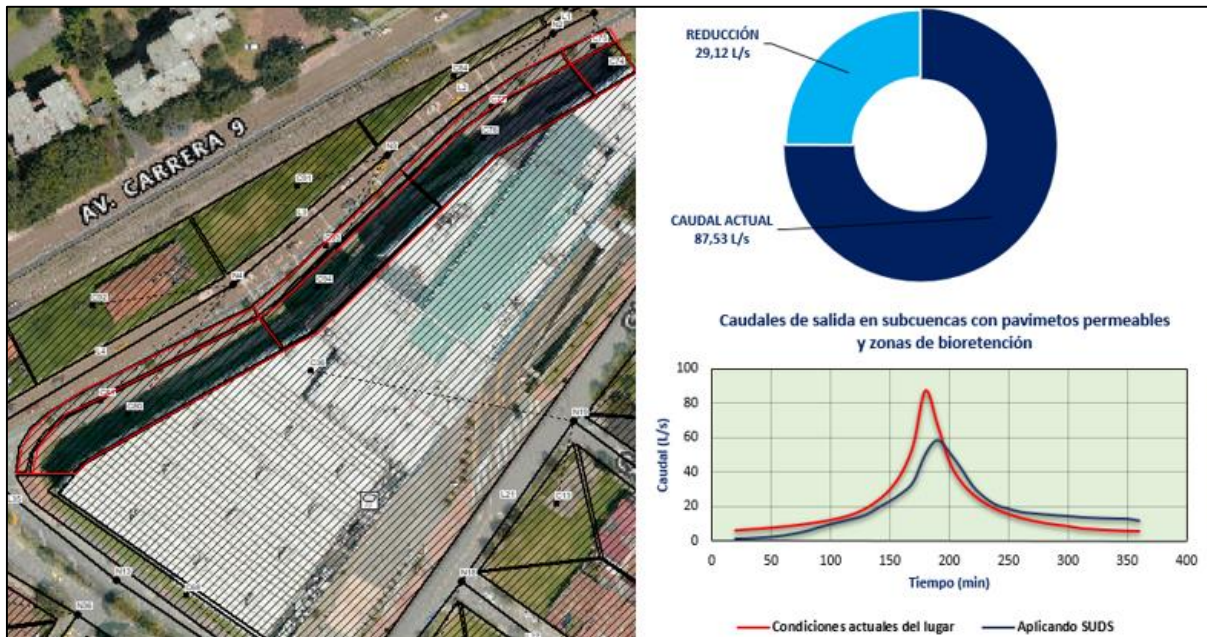


Figura 48. Comparación caudal de salida subcuencas condiciones actuales y aplicando pavimentos permeables junto con zonas de bioretención para un periodo de retorno de 3 años.

Fuente: propia.

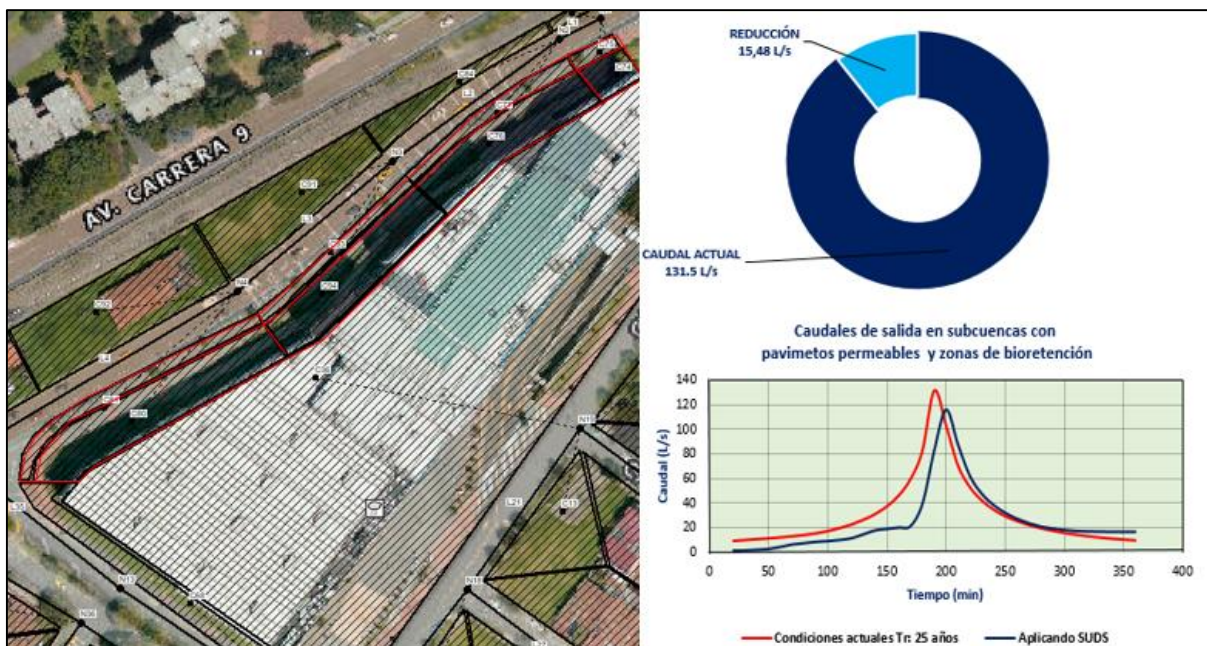


Figura 49. Comparación caudal de salida subcuencas condiciones actuales y aplicando tipologías pavimentos permeables junto con zonas de bioretención para un periodo de retorno de 25 años.

Fuente: propia.

A pesar que los resultados evidenciados en la Figura 48 y Figura 49 brindan un panorama positivo ante la implementación de estas estructuras, se decidió hacer una revisión separada de estas tipologías y el aporte en sus correspondientes áreas de drenaje, donde se halló que la mayor contribución la hace el pavimento asfáltico permeable, mientras que las zonas de bioretención diseñadas inicialmente son insuficientes para reducir los caudales de escorrentía en parte de la Carrera 9 para periodos cortos de retorno. En la Figura 50 y Figura 51, se evidencia la contribución únicamente del pavimento permeable en la reducción de caudales en sus respectivas áreas de aporte para un periodo de retorno de 3 y 25 años.

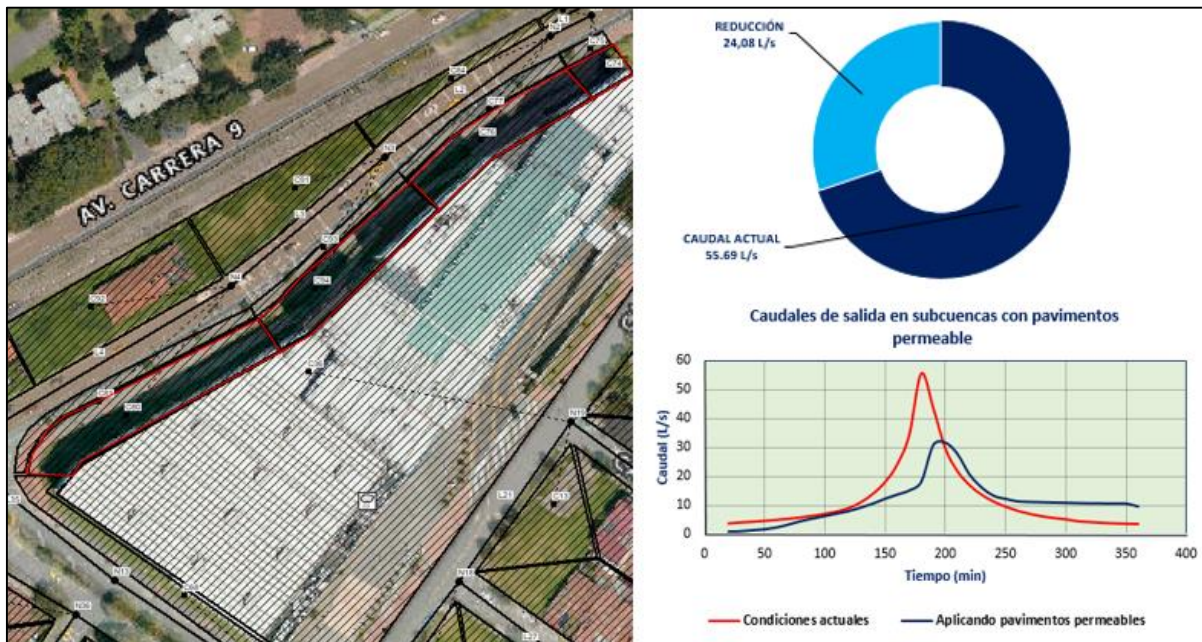


Figura 50. Comparación caudal de salida en subcuencas condiciones actuales y aplicando pavimentos permeables en un periodo de retorno de 3 años.

Fuente: propia.

Cabe resaltar que en las Figura 48 y Figura 50 las áreas de aporte son distintas, en la primera se comparan los caudales en las áreas de aporte que comprenden los pavimentos permeables junto con las zonas de bioretención, mientras en la última se evalúan los caudales de salida teniendo en cuenta únicamente en las áreas de drenaje correspondiente al tramo de pavimento permeable planteado.

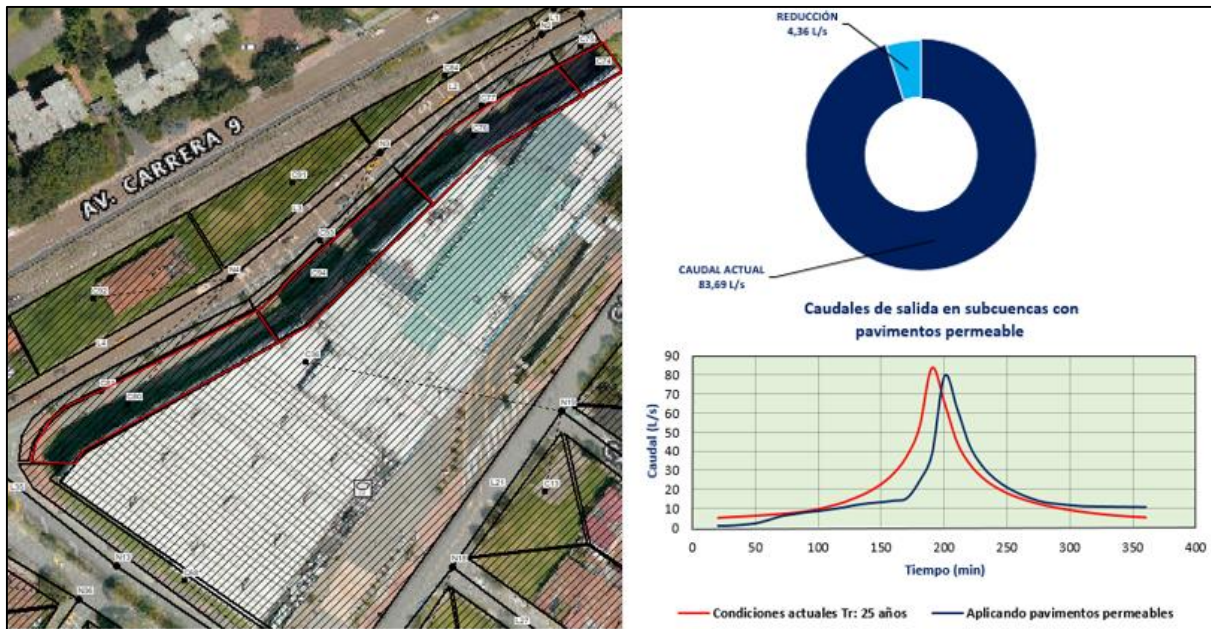


Figura 51. Comparación caudal de salida en subcuencas condiciones actuales y aplicando pavimentos permeables para un periodo de retorno de 25 años.

Fuente: propia.

El tramo de pavimento permeable proyectado, puede reducir el caudal pico un 43 % y retrasarlo unos 20 minutos en sus áreas de aporte, mientras que en condiciones originales se puede esperar un caudal de escorrentía máximo de 55.69 L/s, modificando la capa de rodadura en la ciclovía este se reduce a 31,61 L/s. Por otro lado, en el periodo de retorno para cuando fue diseñada la estructura esta reducción en el caudal pico fue es tan solo 5 % y el tiempo de retardo ahora es de 10 minutos.

Por el contrario, en las zonas de bioretención diseñadas inicialmente su aporte es casi nulo, en la Figura 52, se observa que si bien reduce los caudales de escorrentía que circulan por la calzada las primeras dos horas del evento, no reduce el caudal pico significativamente y mucho menos lo retrasa para un periodo corto de retorno.

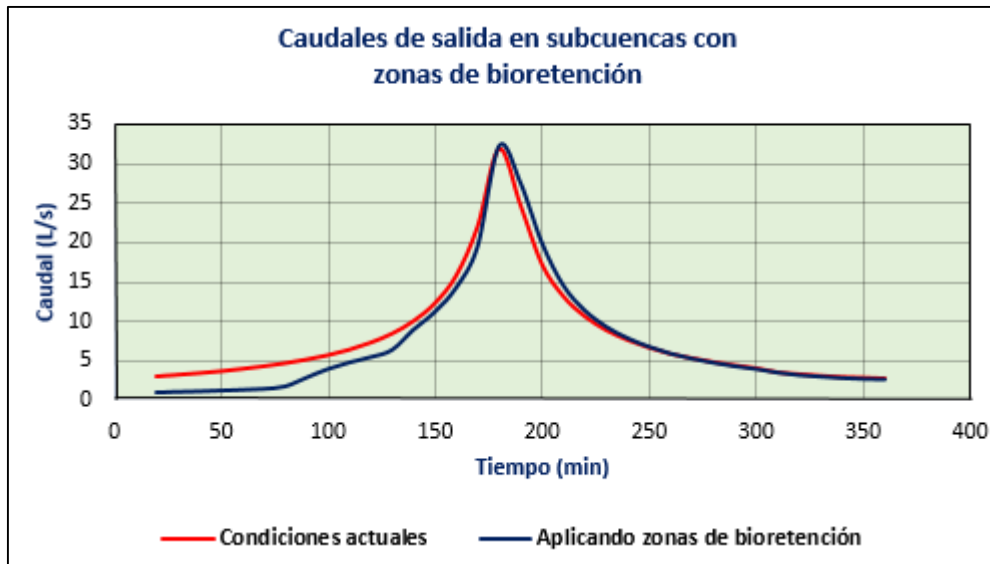


Figura 52. Comparación caudal de salida en subcuencas condiciones actuales y aplicando zonas de bioretención en un periodo de retorno de 3 años.

Fuente: propia.

Aunque haciendo una revisión bibliográfica al trabajo *Modeling Impact Development Alternatives with SWMM*, se encuentra que usando un número diferente o a medida que se incrementa el uso de este tipo de estructuras en un área determinada se puede evidenciar mejor una reducción en la escorrentía, como también un retraso del tiempo pico. Con relación a lo anterior, se decidió hacer algunas modificaciones al modelo y añadir un mayor número de zonas de bioretención con las mismas dimensiones y características diseñada previamente en las áreas dispuestas para su ubicación, estos cambios que se aplicaron en el modelo se encuentra en la Tabla 41.

DISEÑO ORIGINAL		
SUBCUENCAS EN SWMM	Nº DE ZONAS DE BIORETENCIÓN	DIMENSIONES DE TIPOLOGIA
C75	2	1.20 X 2.20
C77	2	1.20 X 3.30
C93	2	1.20 X 3.30
C91	3	1.20 X 3.30
	1	1.20 X 2.20
MODIFICACIÓN 1		
C75	5	1.20 X 2.20
C77	10	1.20 X 3.30
C93	8	1.20 X 3.30
C91	6	1.20 X 2.20
	8	1.20 X 3.30

MODIFICACIÓN 2		
C75	7	1.20 X 2.20
C77	12	1.20 X 3.30
C93	10	1.20 X 3.30
C91	8	1.20 X 2.20
	10	1.20 X 3.30

Tabla 41. Modificaciones realizadas en las subcuencas con zonas de bioretención para mejorar la reducción de caudales pico

Fuente: propia

En la Figura 53, se observan los resultados en la reducción de los caudales de salida de las subcuencas con zonas de bioretención, con las modificaciones planteadas en la Tabla 41 y el diseño inicialmente planteado.

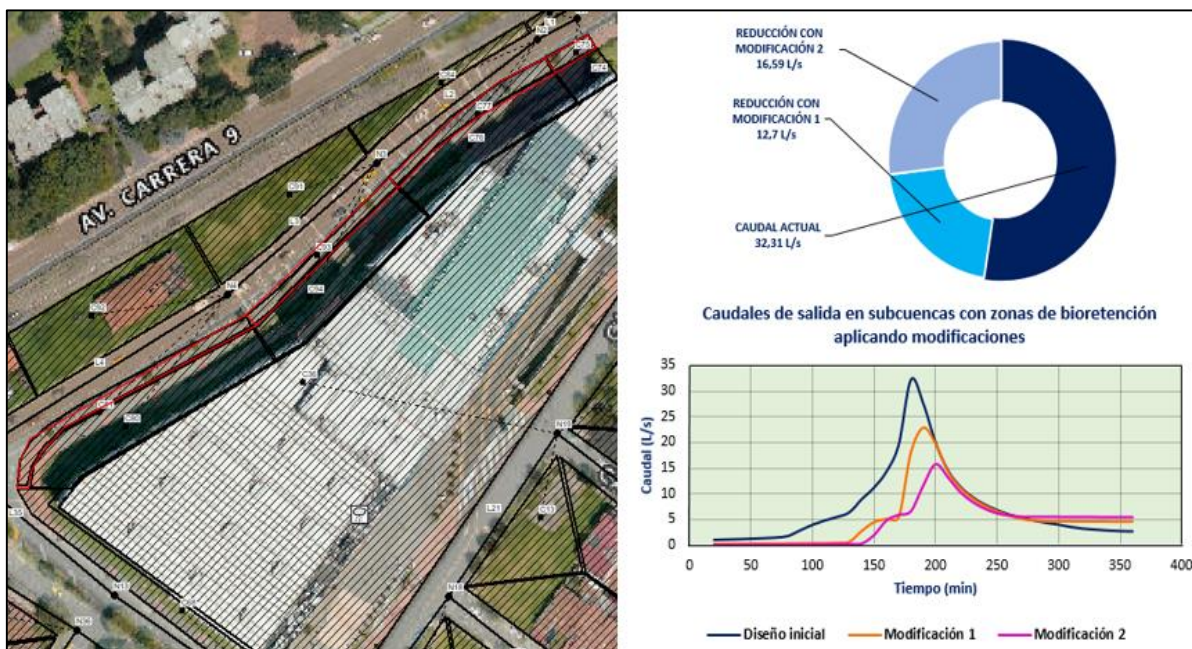


Figura 53. Comparación caudal de salida en subcuencas condiciones actuales y aplicando zonas de bioretención con modificaciones en un periodo de retorno de 3 años.

Fuente: propia.

Con las modificaciones de la Tabla 41, se encontró en la Figura 53 que entre mayores zonas de bioretención los caudales de escorrentía son cero hasta aproximadamente las 2:30 horas del evento, a partir de allí estos aumentan hasta alcanzar su valor máximo de 22.77 L/s con la primera modificación y 15.72 L/s aplicando la segunda. Lo anterior, representa una reducción en los caudales pico del 28 % y 60% respectivamente, lo cual significa que circula una menor cantidad de aguas lluvias por un costado de la Carrera 9, así mismo, se puede

presentar un retraso en el tiempo que se alcanza estos valores máximos de caudal entre 10 a 20 minutos.

Por otro lado, en la Figura 54, al simular la modificación 2 en un periodo de retorno de 25 años es posible eliminar la escorrentía en parte de la Carrera 9 por unos 120 minutos, a partir de allí hay un ascenso hasta alcanzar el valor máximo de 44.71 L/s lo que representa un 6 % con respecto al caudal pico en condiciones actuales del sitio.

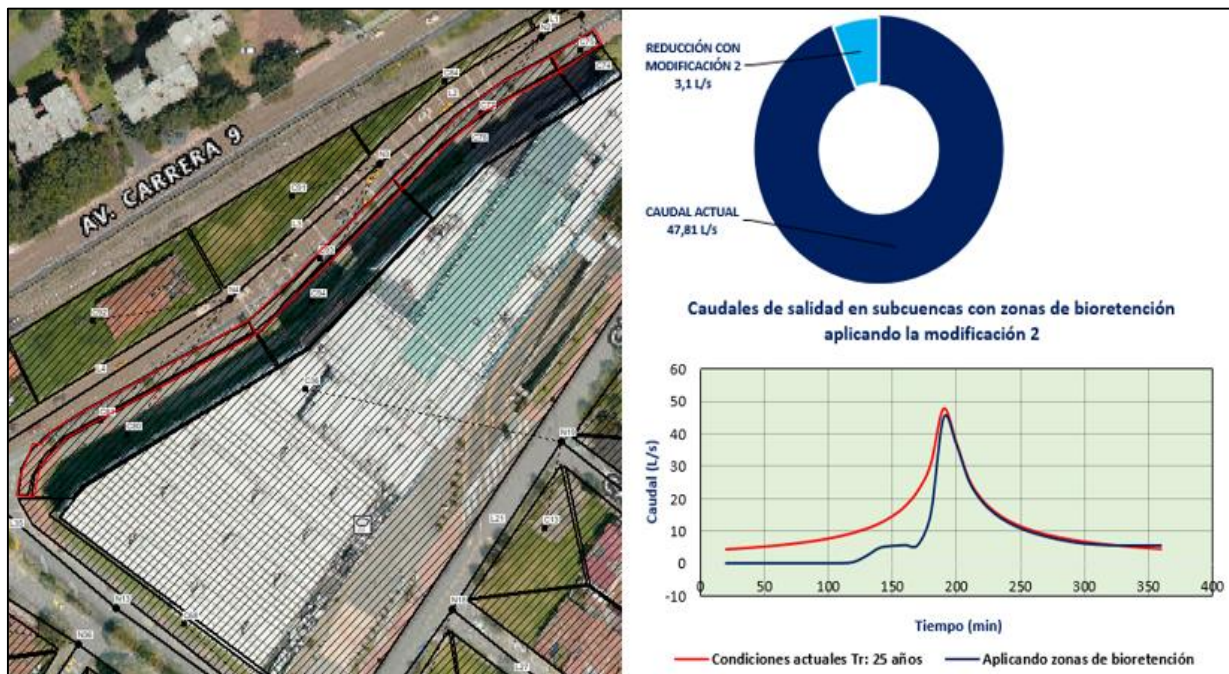


Figura 54. Comparación caudal de salida en subcuencas condiciones actuales y aplicando zonas de bioretención con modificaciones en un periodo de retorno de 25 años.

Fuente: propia.

En cuanto a los tanques de atenuación, que se plantearon al costado Occidental en el separador verde que hace parte de la Estación del Tren de Usaquén de la Carrera 9, entre Calle 110 a 112, se encontró en la Figura 55, que es posible reducir los caudales de escorrentía que circulan por este costado y disminuir los caudales pico un 50 % al pasar de 56.86 L/s a 27.9 L/s. En la Figura 55, también se muestra que pueden desplazar el tiempo en que se alcanza este caudal pico hasta unos 30 minutos, aunque se debe tener en cuenta que no se incluye el tiempo que se tarda las aguas lluvias en desplazarse entre la zanja filtrante.

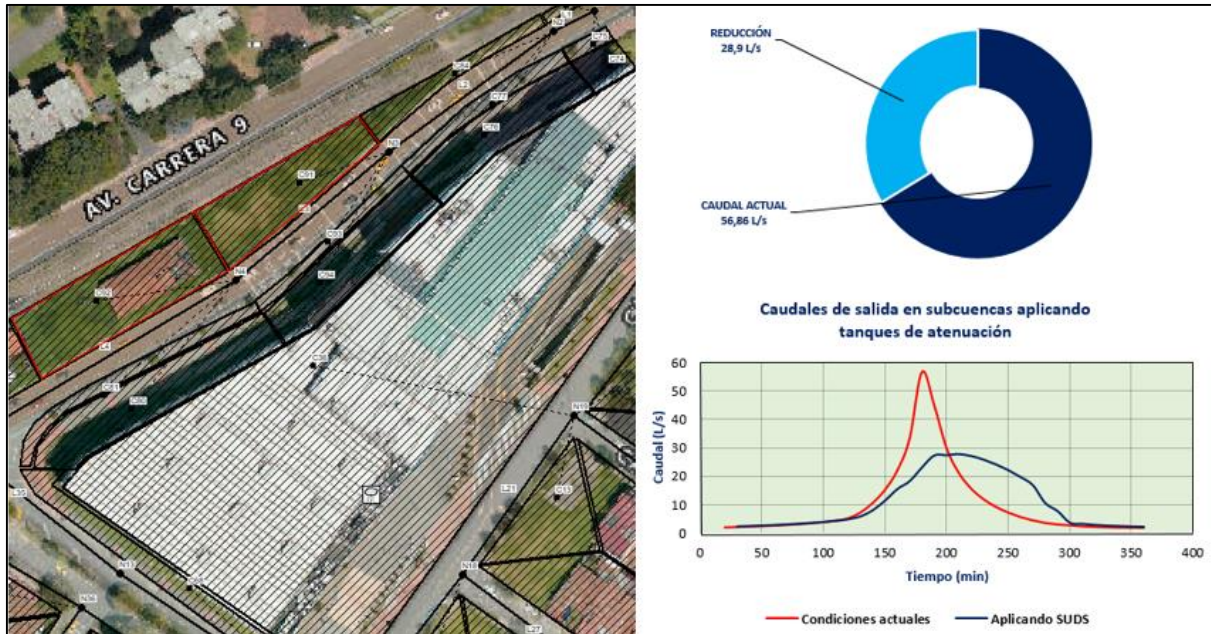


Figura 55. Comparación caudal de salida en subcuencas condiciones actuales y aplicando tanques de atenuación

Fuente: propia.

Por último, haciendo una simulación en conjunto con todas las tipologías propuestas se analiza si son suficientes para solucionar los problemas de capacidad en los colectores y los caudales salientes en pozo, como también evaluar la contribución de todas en mejorar el factor Cantidad en los principios de la filosofía SUDS. En la Figura 56, se determinó que al plantear en el sitio las tipologías de pavimentos permeables, zonas de bioretención y tanques de atenuación se puede reducir los caudales pico de escorrentía de 144.39 L/s a 74.91 L/s, lo cual representa un 48 % aplicando medidas para interceptar y retener las aguas lluvias en áreas duras, promoviendo también procesos naturales como la infiltración en jardines de aguas lluvias.

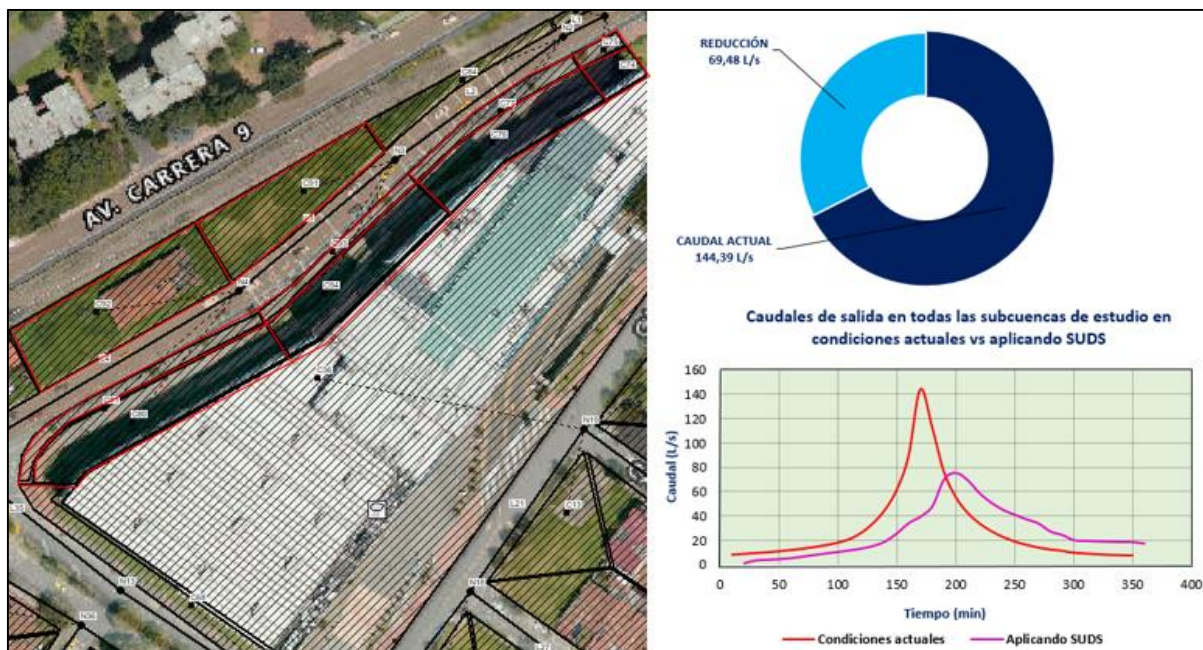


Figura 56. Comparación caudal de salida en área de estudio en condiciones actuales y aplicando todas las tipologías SUDS diseñadas en un periodo de retorno de 3 años

Fuente: propia

En consecuencia, en la Figura 57 se determina también que al aplicar las estructuras de drenaje urbano sostenible se elimina el desborde que se presentaba en el pozo N4, mientras que en el colector L4 se obtiene una relación entre la altura de la lámina del agua y diámetro del 80 %, cuando en condiciones originales transportaba las aguas lluvias a tubo completamente lleno o a presión. No obstante, al hacer varias simulaciones eliminando poco a poco algunas de las tipologías proyectadas para conocer cuáles son más factibles en una primera etapa de construcción o a un corto plazo, se encuentra que para mejorar las condiciones en la red de drenaje pluvial es necesario aplicar todas y cada una de las estructuras propuestas al mismo tiempo, pues solo así se pudo asegurar una mejora significativa en el caudal de rebose y la capacidad en la tubería aplicando SUDS.

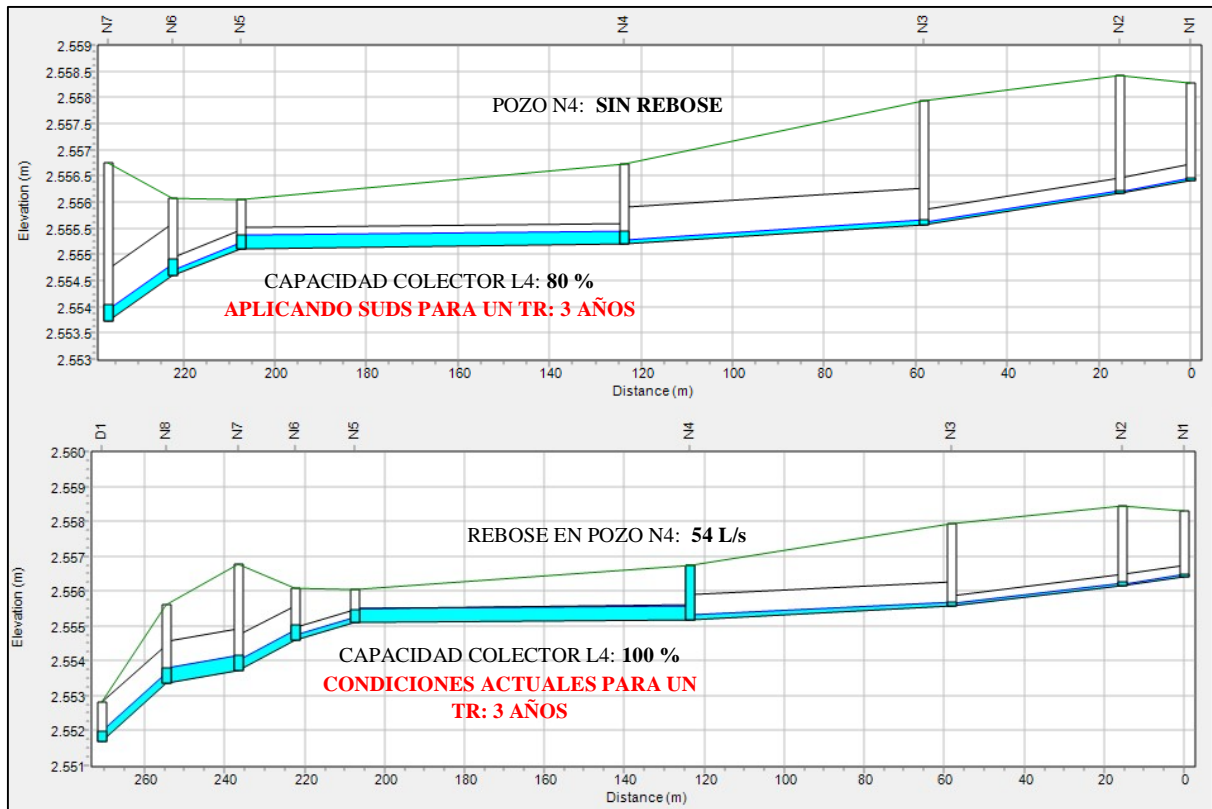


Figura 57. Comparación capacidad y rebose en el colector L4 y pozo N4 aplicando SUDS vs condiciones actuales para un periodo de retorno de 3 años.

Fuente: propia

En la Figura 58, se evalúa la contribución de todas las tipologías SUDS planteadas en el sitio para un periodo de retorno de 25 años donde se muestra que la inclusión de todas las tipologías diseñadas pueden reducir el caudal pico del lugar un 20 % con respecto a las condiciones actuales, esto representa una disminución de 45,5 L/s, por otro lado, mientras para periodos cortos de retorno se puede retrasar el tiempo pico hasta unos veinte minutos, para un periodo más extenso este solo puede retrasarse diez minutos con las estructuras de drenaje sostenible planteadas. También se encontró, que no es posible mejorar las condiciones hidráulicas en la red de alcantarillado pluvial para este periodo puesto que se vuelve a presentar una relación (y/D) en el colector L4 de 100 % y por ende un rebose del sistema en el pozo N4.

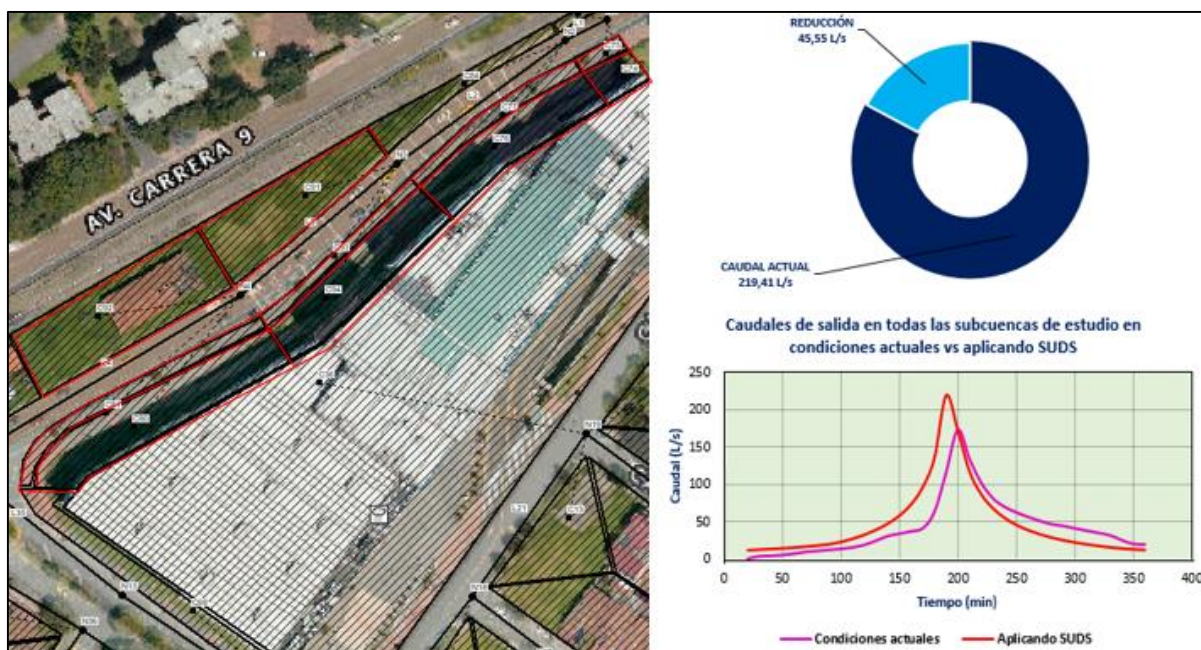


Figura 58. Comparación caudal de salida en área de estudio en condiciones actuales y aplicando todas las tipologías SUDS diseñadas en un periodo de retorno de 3 años

Fuente: propia.

9. CONCLUSIONES

Se cumplió con el propósito de realizar un diseño preliminar para estructuras de drenaje urbano sostenible en la zona de la Carrera 9 entre calles 108 y 112 del sector Usaquéen, con el fin de buscar mejoras en la gestión integral de las aguas pluviales logrando reducir los caudales y volúmenes de escorrentía en el sitio de afectación, y mejorando las condiciones hidráulicas en la red de alcantarillado en dicho punto para precipitaciones en periodos cortos de retorno, lo cual es positivo debido a que uno de los aportes de las tipologías SUDS es tratar las aguas lluvias en los eventos más frecuentes.

En la identificación de las metas u objetivos estratégicos para resolver los problemas en la gestión integral de las aguas lluvias en el sector de estudio, se tenía como hipótesis que una de las posibles causas de las frecuentes inundaciones en el lugar se debían a las características topográficas de un terreno suavemente inclinado, que es un factor determinante para que se presenten encharcamientos. Durante el desarrollo del modelo en SWMM, se pudo evidenciar de forma más clara a través de los perfiles que cerca al punto donde se encuentra ubicada la Estación del Tren de Usaquéen se encuentra un terreno plano o levemente inclinado,

en comparación con las pendientes aguas arriba, como también se observa que el separador de dicha estación actúa como una barrera que impide el flujo natural de la escorrentía, estas condiciones permiten que en un periodo de tiempo se pueda acumular grandes volúmenes de aguas lluvias, que la red no es capaz de evacuar posiblemente porque su capacidad es limitada o en el diseño no se consideró este escenario, lo cual representa una de las desventajas de los sistemas convencionales.

Con relación a lo anterior, en la simulación realizada del lugar en las condiciones actuales se encontró que la red presenta rebose en algunos pozos y una relación (y/D) máxima en varios colectores para un periodo de retorno de tan solo tres años, con lo cual se puede deducir que la red de alcantarillado no hace una correcta gestión de las aguas lluvias para los eventos más frecuentes, y por ende mucho menos para precipitaciones con mayores intensidades en periodos superiores. Observando la Figura 44, se puede notar que en el pozo N4 donde ocurre uno de los reboses se presenta un cambio de diámetro en el colector L4 de 12” que resulta siendo inferior al tramo anterior de 28”, lo anterior supone un error en el diseño debido a que la red de colectores debe ir aumentando su sección a medida que también se incrementan las áreas de aporte o de drenaje. Al principio, se pensó que lo anterior quizás se trataba de un error en la información de la EAAB, pero la calidad del dato en el SIG indicó que estos fueron validados en terreno, por tal razón no solamente las condiciones topográficas del terreno son las únicas que contribuyen a que se presenten encharcamientos en el lugar, también es posible atribuir estos efectos a errores en el dimensionamiento de la red que al principio no se conocían.

En la simulación de las tipologías de drenaje urbano sostenible que se plantean en el lugar, se encuentra que es posible dar cumplimiento con la Resolución 033 de 2017 en el Artículo 153, debido a que estrategias como la modificación en la cobertura de las superficies duras y junto con la aplicación de estructuras de atenuación y almacenamiento se logra una reducción del caudal pico de 47 % en un periodo de retorno corto de 3 años, superior al mínimo que exige la resolución el cual es de 25 %. Al hacer un análisis de la escorrentía antes y después de la implementación de los SUDS, se pudo corroborar que es posible mejorar la capacidad de flujo en los colectores receptores, en especial en la tubería L4 donde se logra reducir la relación de llenado a un 80 % después de transportar las aguas lluvias con su máxima capacidad, así mismo, se evita reboses en el pozo N4 y por ende se solucionan los problemas de inundación en eventos frecuentes.

A pesar de lo anterior, para poder asegurar unas mejores condiciones en el sector y evitar las inundaciones es necesario aplicar cada una de las tipologías diseñadas al mismo tiempo lo cual indica que se necesitaría de una mayor inversión inicial y esto podría representar una oposición, mientras tanto, al analizar el sistema para un periodo de retorno de 25 años si bien se puede asegurar una reducción de los caudales pico en un 24 % no es posible mejorar la capacidad en el colector L4 y de nuevo se presenta un rebose en el sitio. Todo lo anterior, lleva a pensar que sería pertinente corregir en primer lugar el cambio de diámetro que se presenta en el pozo N4 que es quizás la causa más determinante en el aumento de la capacidad y desborde del sistema. Posterior a este, cambio es posible entonces proyectar las estructuras complementarias de drenaje urbano sostenible previamente diseñadas por etapas, o dependiendo del contexto aplicar las que tienen una mejor respuesta como lo son los tanques de atenuación y pavimentos permeables.

La simulación de los SUDS en este sector donde frecuentemente se generan inundaciones, nos permite conocer que su aplicación ayuda a mitigar estos efectos en su origen los cuales generan malestar en los habitantes y transeúntes de la zona por las pérdidas económicas y en patrimonio, puesto que se evidenció que es posible mejorar las condiciones hidráulicas en la red asegurando que no ocurra un rebose del sistema aplicando procesos de almacenamiento, conducción retardada, promoviendo la infiltración y reduciendo los caudales pico, medidas que aseguran un menor volumen de aguas lluvias en el lugar y una descarga controlada al sistema de alcantarillado. Esto representa una ventaja respecto a los drenajes convencionales, sin embargo, es importante recordar que las tipologías de drenaje urbano sostenible son un complemento no un reemplazo del sistema tradicional.

Por otro lado, cabe aclarar que para lograr efectos significativos en la reducción de caudales y volúmenes de escorrentía es importante hacer intervenciones a gran escala o con un área considerable, puesto que el objetivo principal de los SUDS es simular o reproducir las condiciones originales del lugar previas a su desarrollo, esto se evidenció por ejemplo en las zonas de bioretención, las cuales en el diseño inicial se comprobó por medio del software no eran suficientes y no hacían una contribución a la reducción de caudales picos que circulan por parte de la Carrera 9 en precipitaciones con periodos de retorno corto, esto sucedió quizás porque en el diseño se optó por utilizar el área de superficie mínima y se decidió aumentar la altura de la lámina de agua en su superficie , ante estos resultados al final se resolvió en la

simulación de la Figura 53 aumentar la cantidad de estas tipologías con el fin de visualizar una mejor respuesta, claro está que este tipo de modificaciones incurren en mayores costos y en caso de adoptarlas se debe contemplar si es posible o factible desarrollar estos cambios.

En cuanto a las estructuras que tuvieron un mejor comportamiento, como los pavimentos permeables y los tanques de atenuación se puede encontrar que sus aportes en el drenaje del lugar consisten, en sacrificar el caudal pico que se registra en condiciones actuales reduciéndolo al igual que los caudales anteriores a este en la curva de crecimiento, lo cual, se traduce en un menor volumen de aguas lluvias circulando en superficie y que están siendo retenidas ahora por las estructuras de drenaje sostenible, ya sea por las celdas Aquacell o la sub-base de agregado en el pavimento permeable, contribuyen en gran medida a un retardo en el tiempo pico que no se encuentra en las zonas de bioretención, a menos que se aumenten considerablemente la superficie de estas últimas. La contribución significativa que producen estas dos tipologías en el parámetro *Cantidad*, pueden permitir una descarga controlada a la red de alcantarillado pluvial permitiendo que sus condiciones hidráulicas mejoren, como se observa en la curva de descenso por ejemplo de la Figura 50 y Figura 55, donde se evidencia que cerca al final del evento se generan unos caudales de salida bajos y constantes que los colectores pueden manejar sin problema.

Por el contrario, aunque los pavimentos permeables y los tanques de atenuación si bien generan un mayor beneficio no aportan al parámetro *Amenidad* y *Biodiversidad*, lo cual es importante en una zona tan consolidada como Usaquén, de igual forma el mantenimiento de una capa de rodadura porosa requiere de cuidados especiales y los costos de capital son altos comparados con cualquier tipología.

10.BIBLIOGRAFIA

- Alcaldía de Bogotá. (s. f.). Localidad de Usaquén. Bogota.gov.co. Recuperado 2020, de <https://bogota.gov.co/miciudad/localidades/usaquen#:~:text=Usaqu%C3%A9n%20est%C3%A1%20ubicada%20en%20el,cerros%20orientales%20de%20la%20ciudad>.
- Ballard, B., Wilson, S., Clarke, H., Illman, S., Scott, T., & Kellagher, R. (2015). The SUDS Manual (Primera edición). CIRIA.
- Borrero, C., Giraldo, M., & Vega, L. (2016). EVALUACIÓN DEL DISEÑO Y MONITOREO DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE. CASOS DE ESTUDIO: AVENIDA RINCÓN TABOR Y JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ. Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/15033/u754025.pdf?sequence=1>
- Bravo, D. (2020). «Plaza de agua» en Benthemplein. Public Space. <https://www.publicspace.org/es/obras/-/project/h034-water-square-in-benthemplein>
- Bustamante, B. (2015, 23 junio). Usaquén concentra la mayor participación en la construcción de vivienda en Bogotá. Secretaria de desarrollo económico. <http://observatorio.desarrolloeconomico.gov.co/construccion-construccion-bogota/usaquen-concentra-la-mayor-participacion-en-la-construccion-de>
- Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental CIIA & Empresa de Acueducto y Alcantarillado Bogotá EAAB. (2017, febrero). Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Universidad de los Andes. https://issuu.com/sda2015/docs/gu_a_t_cnica_de_dise_o_y_construcci
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología aplicada (Primera edición). McGraw-Hill Education.

- Consejo Local de Gestión del Riesgo y Cambio Climático CLGR-CC. (2017, noviembre). Caracterización General de Escenarios de Riesgo - Localidad de Usaquén. IDIGER.
<https://www.idiger.gov.co/documents/220605/232493/Identificaci%C3%B3n+y+Priorizaci%C3%B3n+.pdf/e74867c0-a4d0-41aa-aec9-0093f2a97c60>
- Culman, C., & Murcia, M. (2020). PREFACTIBILIDAD DE LA INCORPORACIÓN DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) EN LA UGA 030 DE LA SUBCUENCA TORCA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ. Universidad Católica de Colombia.
https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24996/2/TRABAJO_GRADO.pdf
- Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). (2003). LOCALIDAD 1: USAQUÉN - FICHA AMBIENTAL. Alcaldía Mayor de Bogotá. <https://usaquen.files.wordpress.com/2008/11/usaquen-y-el-medio-ambiente.pdf>
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB - ESP. (29 de octubre de 2020). Plan General Estratégico 2020-2024. http://usaquen.gov.co/sites/usaquen.gov.co/files/planeacion/acuerdo_local_002_de_2020_firmado_0.pdf
- Greenworks. (s. f.). Tanner Springs Park. Recuperado 2020, de <https://greenworkspc.com/ourwork/tanner-springs-park>
- <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/13937/u754181.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Illman, S., & Wilson, S. (2017). Guidance on the construction of SUDS (Primera edición). CIRIA.
- Jato-Espino, D., Rodríguez - Hernández, J., Valeri, V., & Castro-Fresno, D. (2019, marzo). Pavimentos urbanos permeables. Revista de Obras Públicas.

https://www.researchgate.net/publication/333134479_Pavimentos_urbanos_permeables

- Junta Administrativa Local de Usaquén. (7 de octubre de 2020). USAQUÉN REVERDECE 2021-2024: UN NUEVO CONTRATO SOCIAL Y AMBIENTAL PARA USAQUÉN. Alcaldía de Usaquén. http://usaquen.gov.co/sites/usaquen.gov.co/files/planeacion/acuerdo_local_002_de_2020_firmado_0.pdf
- Martínez, J. (2017, enero). Metodología para determinar el potencial de implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en áreas residenciales, a partir de análisis de sistemas de información geográfica (SIG) - caso de estudio Bogotá, Colombia. Universidad de los Andes.
- Martinic, A. (2017, diciembre). Áreas verdes y el drenaje urbano sostenible, caso de estudio: Parque inundable Ramón Rada Senosiain, Punta Arenas, Chile. Universidad de Chile, Facultad Arquitectura y Urbanismo. https://issuu.com/beto.jercic/docs/20171221__alberto_jercic_m_seminari
- Medina, D., Aguilar, L., & Calderón, A. (2018). ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) CASO DE ESTUDIO CARRERA 4 Y CARRERA 5 ENTRE CALLES 68 Y 71, SECTOR CHAPINERO ALTO, BOGOTÁ, COLOMBIA. Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22379/1/TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- Nocua, A. (2020, 26 noviembre). Suba, Usaquén y Chapinero agrupan el 32,8% de las empresas de Bogotá. Secretaria de desarrollo económico. <http://observatorio.desarrolloeconomico.gov.co/emprendimiento/suba-usaquen-y-chapinero-agrupan-el-328-de-las-empresas-de-bogota>
- PAVCO. (2017). Aquacell en Centro Comercial Parque La Colina. Pavco wavin. <https://pavcowavin.com.co/aquacell-en-centro-comercial-parque-la-colina>

- Ramírez, P. (2018). EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE: CASO DE ESTUDIO PARQUE METROPOLITANO SAN CRISTÓBAL SUR. Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/34722/u808396.pdf?sequence=1>
- Restrepo, I., Sánchez, L., Galvis, A., Rojas, J., & Sanabria, I. (2007). Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio (Primera edición) [Libro electrónico]. Universidad del Valle. <https://books.google.com.co/books?id=vpFqgpFHBmYC&pg=PA70&dq=sistema+drenaje+urbano+sostenible&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwi3gMCvt7TtAhVLheAKHWQwCfEQ6AEwBHoECACQAg#v=onepage&q=sistema%20drenaje%20urbano%20sostenible&f=false>
- Rodríguez-Hernández, J. (2008, mayo). Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero. Universidad de Cantabria. https://www.researchgate.net/publication/280482999_Estudio_analisis_y_diseno_de_secciones_permeables_de_firmes_para_vias_urbanas_con_un_comportamiento_adecuado_frente_a_la_colmatacion_y_con_la_capacidad_portante_necesaria_para_soportar_traficos_ligero
- Rossman, L. (2010). Modeling Low Impact Development Alternatives with SWMM. Computational Hydraulics International CHI. <https://www.chijournal.org/Journals/PDF/R236-11>
- Sánchez, J. (2020). Fertilidad del suelo y nutrición mineral de plantas. Conceptos básicos. FERTITEC S.A. <http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FERTILIDAD%20DEL%20SUELO%20Y%20NUTRICION.pdf>

- Sandoval, C. (2015). Casos exitosos de SUDS en ciudades con población alta, pocas zonas verdes y lluvias intensas. Pavco wavin. <https://pavcowavin.com.co/casos-exitosos-de-suds-en-ciudades-con-poblacion-alta-pocas-zonas-verdes-y-lluvias-intensas>
- Secretaria Distrital de Ambiente, Jardín Botánico José Celestino Mutis, & Alcaldía Mayor de Bogotá. (2017). Plan Local de Arborización Urbana 2017-2020 localidad de Usaquén. http://oab.ambientebogota.gov.co/wp-content/uploads/dlm_uploads/2019/07/PLAU-USAQU%C3%89N-julio-2018.pdf
- Silva Rodríguez de San Miguel, J. (2019). Diseño urbano sensible al agua retos y oportunidades (primera edición) [Libro electrónico]. Área de innovación y desarrollo, S.L. <https://doi.org/10.17993/EcoOrgyCso.2019.57>
- Trujillo, R. (2013). Dinámica de la construcción por usos localidad Usaquén. Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital. <https://www.catastrobogota.gov.co/sites/default/files/archivos/usaqu%C3%A9n.pdf>
- Villón, M. (2004). Hidrología (Primera edición) [Libro electrónico]. Editorial Tecnológica de Costa Rica. https://books.google.com.co/books/about/Hidrolog%C3%ADa.html?id=-JjGDwAAQBAJ&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

11. ANEXOS