

ANÁLISIS BENEFICIO COSTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS  
URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLES (SUDS) EN CUENCAS URBANAS DE  
USO RESIDENCIAL EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

CHRISTIAN MATEO GÓMEZ VALENZUELA  
SERGIO ANDRÉS SANGUINO LÓPEZ



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO  
ESPECIALIZACIÓN DE RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE  
BOGOTÁ  
2019

## DEDICATORIA:

Se crean diariamente los cimientos de nuestro desarrollo, todos y cada uno de ustedes – *Nuestras familias* – han destinado tiempo para enseñarnos los verdaderos pilares que se necesitan en la vida, brindándonos aportes invaluableles que aplicaremos día a día.

Agradecemos a quienes estuvieron presentes en la evolución y posterior desarrollo total de este proyecto de grado. De manera especial, le agradecemos al tutor quien nos orientó y guio cada uno de los pasos para la construcción de este documento.

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2.2 OBJETIVOS.....	10
2.1 Objetivo General.....	10
2.2 Objetivos Específicos .....	10
3. MARCO TEÓRICO .....	11
3.1 Generalidades de los Sistemas Urbanos de drenaje sostenible (SUDS) .....	11
3.2 Sistemas Urbanos de drenaje sostenible analizados .....	11
3.2.1 Cubiertas verdes .....	13
3.2.1.1 Aplicación.....	14
3.2.2.1 Aplicación.....	15
3.2.3 Cunetas verdes .....	17
3.2.3.1 Aplicación.....	21
3.3 Tanque de almacenamiento de acopio de agua recolectada .....	23
3.3.1 Aplicación.....	23
3.4 <i>Storm Water Management Model (SWMM)</i> .....	24
3.4.1 Capacidades del modelo .....	25
3.4.2 Aplicaciones típicas de SWMM .....	25
4. METODOLOGÍA.....	27
4.1 Alcance de análisis .....	27
4.2 Descripción de la ciudadela a analizar .....	27
4.2.1 Infraestructura que la compone.....	27
4.2.1.1 Generalidades.....	27
4.2.1.2 Número de unidades por urbanización.....	27
4.2.1.3 Descripción de apartamento tipo .....	27
4.2.1.4 Zonas comunes dentro de la urbanización .....	31
5. ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO.....	37
5.1 Análisis hidrológico de las zonas proyectadas para ubicar la ciudadela .....	37
5.1.1 Curva Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) .....	37
5.1.2 Atmósfera – Relacionada a la ciudad de Bogotá .....	44
5.1.2.1 Temperatura.....	44
5.1.2.2 Brillo solar .....	45
5.1.2.3 Velocidad del viento.....	46
5.2 Descripción técnica y aplicación de los SUDS en el proyecto seleccionado .....	47
5.2.1 Diseño pluvial de la urbanización.....	48

5.2.1.1	Diseño de bajantes de aguas lluvias.....	48
5.2.1.2	Cubiertas verdes.....	53
5.2.1.3	Zanjas de infiltración .....	58
5.2.1.4	Cunetas verdes.....	58
5.2.1.5	Diseño de tanque de almacenamiento de acopio agua lluvia captada.....	63
5.2.1.6	Diseño de red de drenaje hasta conexión a colector exterior a la urbanización (Red general de la ciudadela).....	73
5.2.1.7	Diseño de colector exterior (Colector que une todas las descargas) ..	76
5.2.1.8	Simulación de escenarios Ubicación No.1 – Ubicación No.3 .....	77
6.	COMPARACIÓN DE BENEFICIO VS COSTO .....	87
6.1	Costo de agua en cada uno de los estratos propuestos .....	87
6.2	Proyección de ahorro del agua utilizada para abastecer los servicios generales.....	87
6.3	Proyección de ahorro en el costo del sistema de drenaje pluvial interno en la urbanización con la implementación de los SUDS.....	88
6.3.1	Análisis de costo Cubiertas verdes.....	89
6.3.2	Análisis de costo Cunetas Verdes .....	90
6.3.3	Análisis de Tanque de acopio aguas lluvias .....	91
6.3.4	Análisis de costo conexión desde tanque de acopio a colector exterior .....	91
6.3.4.1	Con implementación de SUDS.....	91
6.3.4.1	Sin implementación de SUDS .....	93
6.4	Proyección de ahorro en el costo del sistema de drenaje general de la ciudadela (Colector principal), con la implementación de los SUDS .....	95
6.4.1	Análisis de costo colector principal de la Ciudadela – Sin SUDS.....	95
6.4.1.1	Ubicación No.1 – Sin implementación de SUDS.....	96
6.4.1.2	Ubicación No.2 – Sin implementación de SUDS.....	97
6.4.1.3	Ubicación No.3 – Sin implementación de SUDS.....	98
6.4.2	Análisis de costo colector principal de la Ciudadela – Con SUDS .....	98
6.4.2.1	Ubicación No.1 y No.2 – Con implementación de SUDS .....	99
6.4.2.2	Ubicación No.3 – Con implementación de SUDS.....	99
7.	CONCLUSIONES – ANÁLISIS FINAL.....	100
7.1	Costo comparativo de los colectores internos.....	100
7.2	Costo comparativo del colector principal de la urbanización .....	101
7.3	Costo comparativo entre la implementación de estructuras independientes (Cubiertas verdes y tanque de almacenamiento) con el ahorro de los colectores internos y externos .....	102
7.4.	Proyección del costo de agua ahorrada por la implementación de los SUDS vs. Construcción de SUDS.....	103
7.5	Alternativas de viabilidad a la instalación de los SUDS en la totalidad de los proyectos.....	104
7.5.1	Alternativa No.1: No integrar las cubiertas verdes en los proyectos.....	105

7.5.2 Alternativa No.2: No integrar las zanjas de infiltración en los proyectos y cambiarla por filtros en las zonas verdes.....	107
7.6. Conclusiones específicas del análisis .....	110
7.6.1 Análisis costos de la totalidad del sistema inicial propuesto (totalidad de los SUDS) .....	110
7.6.2 Análisis de alternativas de viabilidad de la implementación de SUDS .....	111
7.7 Recomendaciones .....	113
7.7.1 Análisis constructivo y de operación.....	113
7.7.2 Análisis del programa computacional EPA SWMM .....	114
8. BIBLIOGRAFÍA.....	115

### TABLA DE FIGURAS

Figura 1– SUDS – Ciudad de Bogotá.....	12
Figura 2 – Cubiertas verdes.....	13
Figura 3 – Cubiertas verdes (Aplicación).....	14
Figura 4 – Zanjas de infiltración .....	15
Figura 5 – Zanjas de infiltración (Aplicación) .....	16
Figura 6 – Cunetas verdes .....	17
Figura 7 – Cuneta verde tipo Tradicional.....	19
Figura 8 – Cuneta verde tipo Seca .....	20
Figura 9 – Cuneta verde tipo Húmeda .....	21
Figura 10– Cunetas verdes (Aplicación).....	22
Figura 11 – Tanque de almacenamiento de acopio de aguas lluvias tipo .....	23
Figura 12 – Ubicación tanque de almacenamiento de aguas lluvias provenientes de los SUDS .....	24
Figura 13 – Planta apartamento tipo .....	28
Figura 14 – Sección torre tipo.....	29
Figura 15- Distribución urbanización .....	30
Figura 16 - Zonas Comunes .....	31
Figura 17- Sección Longitudinal – Edificio comunales .....	32
Figura 18 – Ubicación No. 1.....	33
Figura 19 – Ubicación No. 2.....	34
Figura 20 – Ubicación No. 3.....	35
Figura 21 – Ubicaciones implantadas en el Mapa Catastral de Bogotá.....	36
Figura 22 – Ubicación IDF Usaquén – Ubicación No.1 .....	38
Figura 23 – Curva IDF – Usaquén .....	39
Figura 24 - Ubicación IDF Puente Aranda – Ubicación No.2 .....	40
Figura 25 – Curva IDF – Puente Aranda .....	41
Figura 26 - Ubicación IDF Bosa Barreno 2 – Ubicación No.3 .....	42
Figura 27 – Curva IDF – Bosa Barreno 2 .....	43
Figura 28 – Temperatura .....	45

Figura 29 – Brillo solar .....	46
Figura 30 – Velocidad del viento .....	46
Figura 31 – Humedad relativa .....	47
Figura 32 - Distribución de bajantes de aguas lluvias .....	49
Figura 33 – Ingreso de datos de área aferente correspondiente a cada bajante ...	50
Figura 34 – Ingreso de datos – Serie de tiempo de intensidades. ....	51
Figura 35– Resultados prediseño bajantes de aguas lluvias .....	52
Figura 36 – Resultados diseño definitivo bajantes de aguas lluvias – Sin cubiertas verdes .....	53
Figura 37- Porcentaje de reducción de escorrentía .....	54
Figura 38- Cubiertas verdes.....	55
Figura 39- Propiedades del suelo .....	55
Figura 40 - Propiedades del manto drenante.....	56
Figura 41- Porcentaje del área de cubierta verde .....	56
Figura 42- Resultados Cubierta Verde.....	57
Figura 43- Instalación definitiva de bajantes de aguas lluvias .....	58
Figura 44- Parámetros de diseño de cunetas verdes .....	59
Figura 45- Área para drenaje de cunetas .....	60
Figura 46- Modelo cunetas verdes .....	62
Figura 47 - Asignación al área de drenaje.....	62
Figura 48 - Resultados Cunetas Verdes.....	63
Figura 49 – Coberturas de la totalidad de la urbanización .....	64
Figura 50 – Área útil para el prediseño del tanque de almacenamiento de agua lluvia .....	65
Figura 51 – Distribución general de la red de drenaje pluvial .....	67
Figura 52 – Distribución general de la red de drenaje pluvial – SWMM – Con base a Figura 51 .....	68
Figura 53 – Distribución general de la red de drenaje pluvial – Diámetros definitivos .....	69
Figura 54 - Caudales en la entrada del tanque.....	70
Figura 55 - Velocidades en los tramos – distribución general pluvial de Localización (2) .....	70
Figura 56 - Capacidad hidráulica en porcentaje de tuberías Localización (2).....	71
Figura 57 – Distribución tanque de almacenamiento aguas lluvias .....	72
Figura 58 – Colectores internos a conexión externa .....	74
Figura 59 – Colectores internos – Sistema de drenaje pluvial interno.....	78
Figura 60 – Costo Comparativo – Conexión desde salida tanque de almacenamiento a colector principal de la urbanización.....	100
Figura 61 – Costo Comparativo – Conexión colector principal de la urbanización .....	101

Figura 62 – Costo Comparativo – Ahorro de dinero vs. Estructuras independientes .....	102
Figura 63 – Ilustración Comparativa de alternativa de viabilidad – Sin implementación de Cubiertas verdes .....	106
Figura 64 – Alternativa para drenaje zonas verdes con filtro .....	108
Figura 65 – Ilustración Comparativa de alternativa de viabilidad – Reemplazando las zanjas de infiltración por filtros en forma de espina de pescado .....	109

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 – Descripción Ubicación No. 1 .....	33
Tabla 2 – Descripción Ubicación No. 2 .....	34
Tabla 3 – Descripción Ubicación No. 3 .....	35
Tabla 4 – Prediseño bajantes aguas lluvias - torre .....	49
Tabla 5 - Prediseño cuneta verde .....	61
Tabla 6 – Cálculo de caudal captado en zonas verdes .....	64
Tabla 7 – Cálculo de caudal captado en zonas pavimentadas .....	65
Tabla 8 – Predimensionamiento del tanque de agua lluvia .....	66
Tabla 9 – Dimensionamiento final del tanque de agua lluvia – Ubicación No.2.....	72
Tabla 10 – Dimensionamiento Colectores internos – Ubicación No.2.....	75
Tabla 11 – Dimensionamiento Colectores Externo (Conexión de descargas) .....	77
Tabla 12 – Tormenta de diseño - Ubicación No.1 – Usaquén .....	79
Tabla 13 – Dimensionamiento final del tanque de agua lluvia – Ubicación No.1 ...	79
Tabla 14 – Resultados de colectores internos– Ubicación No.1 .....	80
Tabla 15 – Resultados de colectores Internos– Ubicación No.1 .....	81
Tabla 16 – Resultados Colector total Ciudadela – Ubicación No.1.....	82
Tabla 17 – Tormenta de diseño - Ubicación No.3 – Bosa .....	83
Tabla 18 – Dimensionamiento final del tanque de agua lluvia – Ubicación No.3 ...	83
Tabla 19 – Resultados de colectores internos– Ubicación No.3 .....	84
Tabla 20 – Resultados de colectores Internos– Ubicación No.3 .....	85
Tabla 21 – Resultados Colector total Ciudadela – Ubicación No.3.....	86
Tabla 22 – Costos por m <sup>3</sup> de agua según el estrato.....	87
Tabla 23 – Proyección de ahorro del agua según lo almacenado por medio de SUDS .....	88
Tabla 24 - APU Cubiertas Verdes.....	89
Tabla 25 - Costo Total Cubiertas Verdes.....	89
Tabla 26 - APU Cunetas Verdes .....	90
Tabla 27 - Costo Total Cunetas Verdes.....	90
Tabla 28 - APU Tanques de almacenamiento de agua.....	91
Tabla 29 - APU Colector de 8 Pulgadas .....	92
Tabla 30 – Costo total de conexión Colector 8 Pulgadas – Con SUDS .....	92

Tabla 31- APU Colector 10 Pulgadas.....	93
Tabla 32 – Costo total de conexión Colector 10 Pulgadas – Con SUDS.....	93
Tabla 33 - APU Colector 12 Pulgadas .....	94
Tabla 34 – Costo total de conexión Colector 12 Pulgadas – Sin SUDS.....	94
Tabla 35 – Costo total de conexión Colector 10 Pulgadas – Sin SUDS.....	94
Tabla 36 - APU Colector de 24 pulgadas – Sin SUDS – Ubicación No.1 .....	96
Tabla 37 – Costo total de conexión Colector Principal 24 Pulgadas – Sin SUDS – Ubicación No.1 .....	96
Tabla 38 - APU Colector de 27 pulgadas – Sin SUDS – Ubicación No.2 .....	97
Tabla 39 – Costo total de conexión Colector Principal 27 Pulgadas – Sin SUDS – Ubicación No.2.....	97
Tabla 40 - APU Colector de 20 pulgadas – Sin SUDS – Ubicación No.3 .....	98
Tabla 41 – Costo total de conexión Colector Principal 20 Pulgadas – Sin SUDS – Ubicación No.3.....	98
Tabla 42 – Costo total de conexión Colector Principal 20 Pulgadas – Con SUDS - – Ubicación No.1 y No.2.....	99
Tabla 43 - APU Colector de 18 pulgadas – Con SUDS – Ubicación No.3.....	99
Tabla 44 – Costo total de conexión Colector Principal 18 Pulgadas – Con SUDS - – Ubicación No.3.....	99
Tabla 45 – Diferencia comparativa de colectores internos Sin SUDS vs. Con SUDS .....	100
Tabla 46 – Diferencia comparativa colector principal (Urbanización) Sin SUDS vs. Con SUDS.....	101
Tabla 47 – Análisis de costo: Dinero ahorrado por la implementación de SUDS en colectores internos y colector principal vs. Construcción de estructuras independientes necesarias para el sistema general.....	102
Tabla 48 – Costo total de la infraestructura con SUDS.....	103
Tabla 49 – Cuantificación de los años en los que se retornaría la inversión.....	104
Tabla 50 – Resumen costo de sistema de drenaje con y sin SUDS.....	105
Tabla 51 - Costo Total Cubiertas Verdes.....	105
Tabla 52 – Comparación de alternativa de viabilidad – Sin implementación de Cubiertas verdes.....	105
Tabla 53 - Análisis Total Alternativa No. 1 de viabilidad .....	106
Tabla 54 – APU – Filtro para drenar zonas verdes.....	109
Tabla 55 – APU – Costo total – Filtro para drenar zonas verdes .....	109
Tabla 56 - Análisis Total Alternativa No. 2 de viabilidad .....	110
Tabla 57 – Costo total del sistema de drenaje pluvial con base a la alternativa No.1 de viabilidad.....	112

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los sistemas de drenaje urbano convencionales están conformados por alcantarillados y estructuras hidráulicas que cumplen la función de evacuar el agua proveniente de escorrentía superficial y/o infiltración derivada del ciclo hidrológico normal del agua. Con el objeto de mejorar las condiciones hidráulicas de los colectores que hacen parte del sistema de alcantarillado, se han implementado una serie de estrategias para optimizarlos, en las que se incluyen los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (en adelante se denomina SUDS).

En el estudio de las diferentes alternativas para mitigar estos procesos para disminuir los picos en los hidrogramas de los sistemas, se han implementado estructuras hidráulicas con tipologías de SUDS, que en su mayoría, son diseñados para alcanzar dos objetivos fundamentales: 1. Reducir los volúmenes de escorrentía que son descargados directamente a colectores del drenaje general en una ciudad, minimizando a su vez los impactos asociados a eventos de inundación; y 2. Mejorar la calidad del agua pluvial durante su captación, detención, conducción, filtración y/o retención.

Junto con la implementación de los SUDS, los sistemas de reutilización de agua captada por diferentes métodos dentro del sistema de drenaje interno de las urbanizaciones, se considera una de las formas más adecuadas para darle un segundo uso a este recurso. Por una parte, contribuye a mitigar posibles picos en los sistemas de drenaje, lo que implica que la reutilización del acopio de aguas lluvias tiene un ahorro considerable en el uso del agua y con ello se disminuye el costo del agua para los usuarios. Por otra, comprende un escenario de sostenibilidad en el cuidado del recurso hídrico, el cual se considera como escaso.

En este marco, el proyecto propuesto en este documento pretende establecer los parámetros técnicos requeridos para realizar la selección y diseño de las tipologías de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) más adecuados para buscar la viabilidad al implementar este sistema a proyectos en Colombia. La metodología de análisis se implementó sobre una cuenca urbana localizada en tres diferentes estratos en la ciudad de Bogotá (uno, tres y seis), y de manera conjunta, la implementación del acopio de aguas lluvias en un sistema dinámico para la reutilización de las mismas. Lo anterior a fin de establecer el costo y beneficio que se tendrá al implementar estas dos metodologías en una ciudadela compuesta por diez (10) urbanizaciones.

## 2.2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

Analizar los costos y beneficios de la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), en una ciudadela compuesta por diez (10) urbanizaciones (dispuesta por siete torres de cinco pisos cada una), para identificar el nivel de ahorro del agua acopiada –agua precipitada almacenada- para un segundo uso, la cual se refleja en una economía de los usuarios del sistema y la viabilidad de implementar los SUDS en un proyecto en la ciudad de Bogotá.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Analizar cuáles de las tipologías de los Sistemas de Drenaje Sostenibles se logran implementar en la urbanización, buscando el equilibrio económico entre la instalación de estos y la viabilidad del proyecto.
- Diseñar un sistema general de drenaje pluvial, integrando los SUDS en cada urbanización por medio del programa computacional *Storm Water Management Model* (SWMM).
- Realizar la comparación de los costos de agua ahorrada por medio de reutilización del agua acopiada y utilizada para servicios generales en la totalidad de la ciudadela, con los costos por la implementación de los SUDS en las tres ubicaciones propuestas.
- Diseñar y cuantificar el costo del colector pluvial que conecta cada una de las descargas de las urbanizaciones con y sin la implementación de SUDS.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Generalidades de los Sistemas Urbanos de drenaje sostenible (SUDS)

Los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS), son el conjunto de estructuras que permiten el control, planeación y diseño de posibles soluciones para el manejo y gestión de aguas pluviales en entornos urbanos, con el fin de garantizar el vertimiento del agua en sistemas de alcantarillado o cuerpos receptores de los sistemas de drenaje pluvial.

El principio básico de los SUDS es ayudar a mitigar los cambios hidrológicos que se presenten producto del desarrollo y las intervenciones antropogénicas, con el objeto de que se dé un régimen más natural del flujo y se optimice el desarrollo del funcionamiento de los drenajes en el alcantarillado en una determinada zona.

Los SUDS se encuentran en la búsqueda de reproducir, de la manera más cercana posible, el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización o actuación urbana para mitigar los problemas de cantidad y calidad de las escorrentías urbanas.

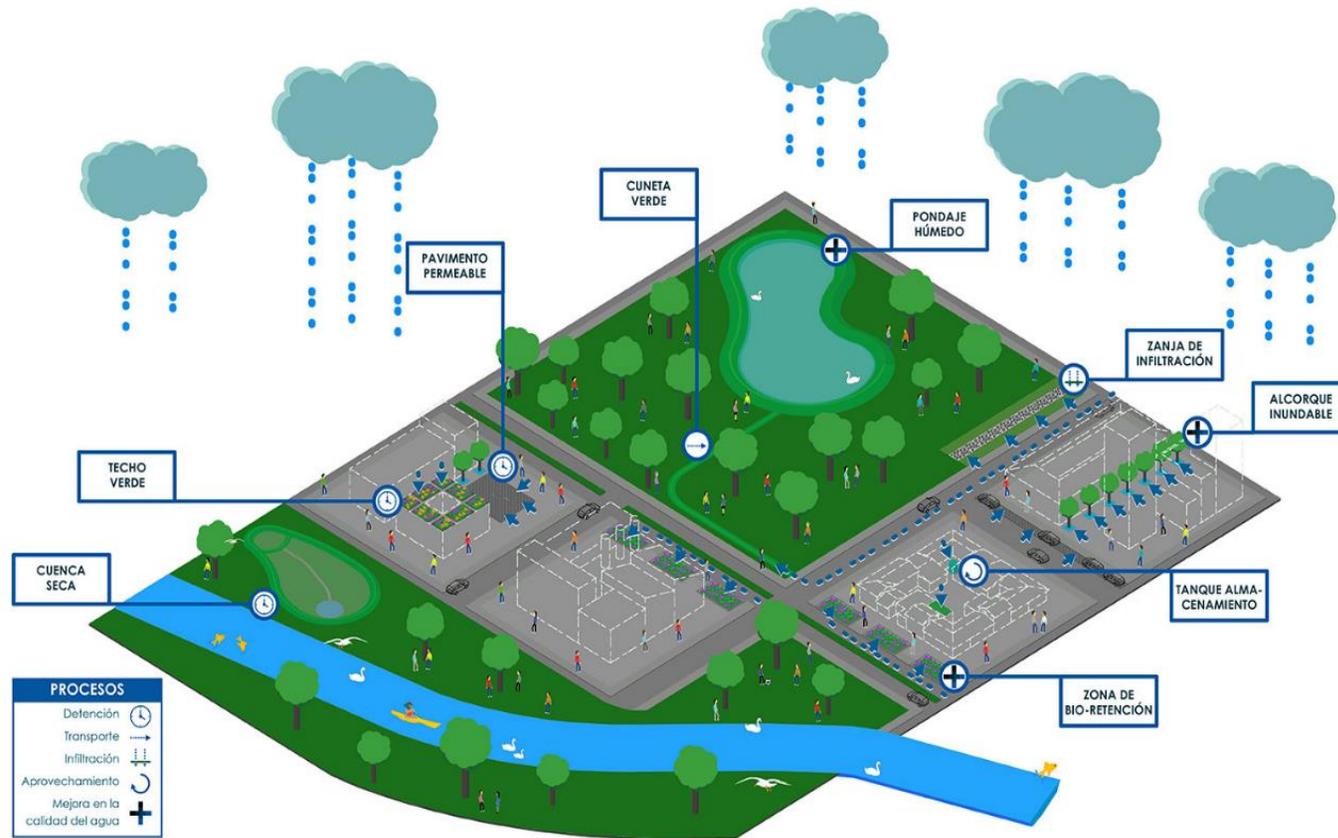
Dentro de los principales beneficios de la implementación de las tipologías SUDS como alternativa complementaria a los sistemas de drenaje convencionales, se incluyen los siguientes:

- Calidad del recurso hídrico: Reducción de cargas contaminantes en el agua, producto de escorrentía que llega al sistema de drenaje convencional o que es descargada directamente a los cuerpos receptores como lugar de acopio.
- Preservación de cuerpos de agua naturales en los cuales se realiza el vertimiento, con el objeto de preservar sus funciones hidrológicas naturales.
- Reducción de costos de construcción y mantenimiento de la infraestructura de drenaje convencional de escorrentía (objeto del presente trabajo).
- Realización de diseños sostenibles con el medio ambiente, siendo apoyo para los controles tradicionales de escorrentía implementados en los sistemas de drenaje común.
- Lograr el análisis del aprovechamiento del agua pluvial como recurso que tiene un segundo uso, y así mismo, generar ahorros en el costo del agua.
- Disminución del riesgo de inundaciones al reducir caudales pico en diferentes periodos.

#### 3.2 Sistemas Urbanos de drenaje sostenible analizados

El fin del presente trabajo de grado, es implementar una serie de SUDS en un sistema de drenaje que se interconecta entre sí, para generar un régimen más eficiente en todo sentido (costo y parámetros hidráulicos). En esta línea, en la Figura 1 se observa un complejo en el cual están incorporados todos los posibles SUDS en una misma red de drenaje en la Ciudad de Bogotá.

Figura 1– SUDS – Ciudad de Bogotá



Fuente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2017

Acorde a lo anterior, se considerará en el marco teórico la implementación de los siguientes tipos de SUDS en las urbanizaciones a analizar:

### 3.2.1 Cubiertas verdes

Las cubiertas verdes son un sistema de drenaje que permite captar lluvia a través de su superficie. Son conformados por varias capas de material normalmente filtrante, con una capa final (parte superior) de cobertura vegetal, como se puede observar en la Figura 2.

Figura 2 – Cubiertas verdes



#### Tipos de Cubierta

- **Extensiva:** Espesor 5-8 cm / Volumen vegetal bajo / Cargas: 50-150 kg/m<sup>2</sup> / Mantenimiento: Bajo / Generalmente autoregulados (sin sistema de riego)
- **Intensiva:** Espesor > 8 cm / Volumen vegetal medio o abundante / Cargas: 160-1000 kg/m<sup>2</sup> / Mantenimiento: Regular / Sistema de riego automático
- **Inclinada:** Cubiertas con pendientes mayores a 15% / Sistema con estabilizador de sustratos

Fuente: Vertin – Cubiertas verdes, 2017

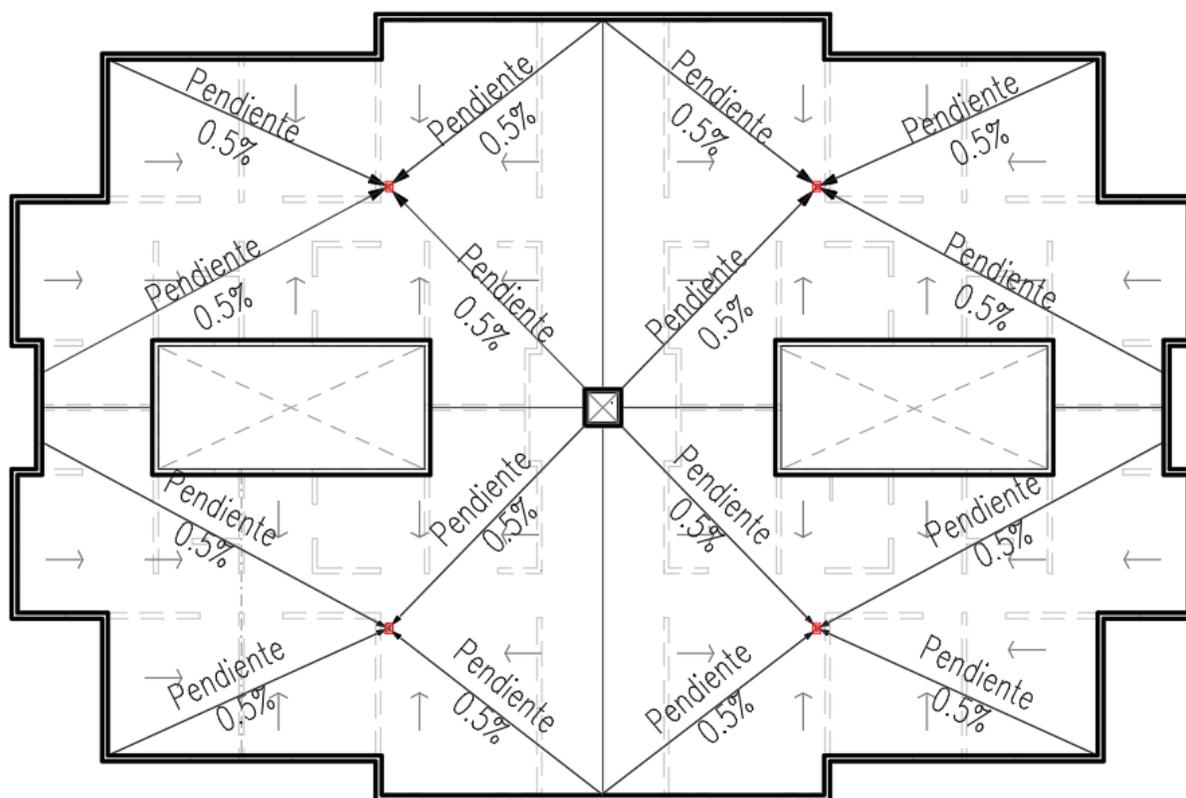
Este sistema de drenaje es utilizado en cubiertas, y su función principal es la de interceptar y retener aguas pluviales, presentando una reducción en el caudal generado producto de escorrentía pluvial lo que atenúa los picos que se puedan presentar a partir de un medio filtrante. Por otro lado, tienen una funcionalidad como aislantes térmicos en edificaciones, producto de entornos altamente urbanizados.

Según la empresa Groncol (Empresa que se encarga en la elaboración de estructuras verdes en Colombia) un metro cuadrado de techo verde tiene el potencial de producir el oxígeno necesario para una persona, limpiar el 15% del material particulado generado por (1) vehículo y retener 50.00 Litros de agua en un año. (DINERO, 2016).

### 3.2.1.1 Aplicación

En este estudio, las cubiertas verdes mencionadas estarán en la totalidad de las terrazas de cada torre que compone la ciudadela a analizar. Cada cubierta verde (por cada torre) tiene un área de total de 303.69 m<sup>2</sup>. A continuación se mostrará la cubierta tipo con sus respectivas características (Ver Figura 3) y su ubicación dentro del sistema.

Figura 3 – Cubiertas verdes (Aplicación)



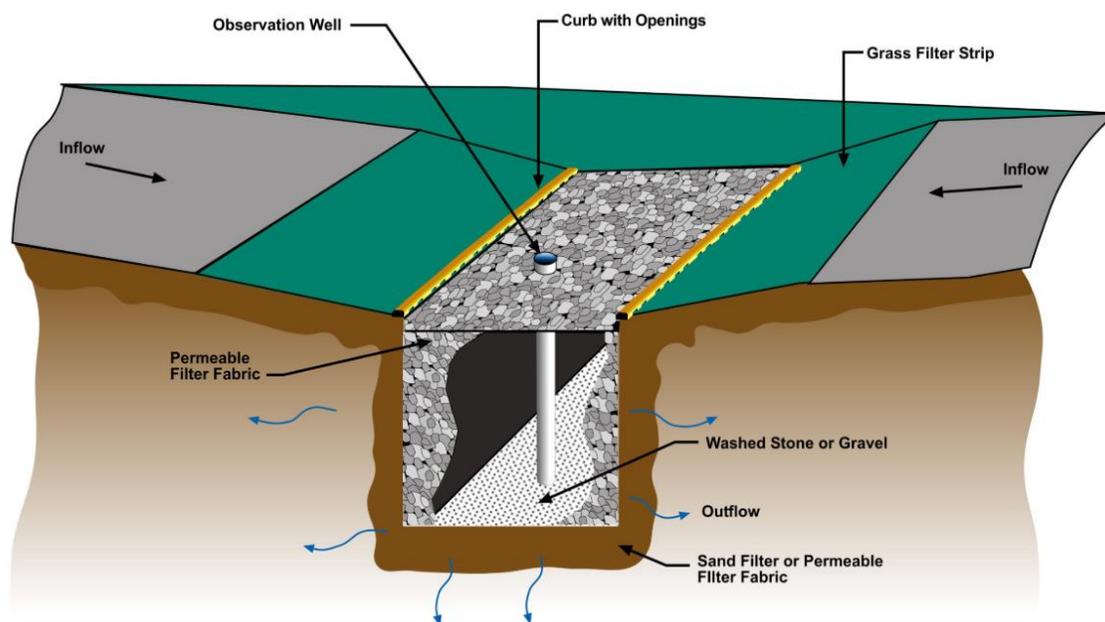
### **PLANTA ARQUITECTÓNICA DE CUBIERTA**

### 3.2.2 Zanjas de infiltración

Estos sistemas son conocidos como pozos o zanjas de drenaje, los cuales tienen profundidades entre 1.00 metros a 3.00 metros. Se encuentran rellenos de material permeable que puede ser de tipo granular o sintético y tienen la propiedad de tener una eficiencia bastante alta en pendientes de baja inclinación (Se considera baja pendiente a valores entre 1.00% – 2.50%). En ningún caso, la profundidad será mayor a la longitud de la altura de la vegetación. Para mitigar procesos erosivos se puede revestir

la zanja con roca o grava. La composición de las zanjas de infiltración se puede observar en la Figura 4.

*Figura 4 – Zanjas de infiltración*



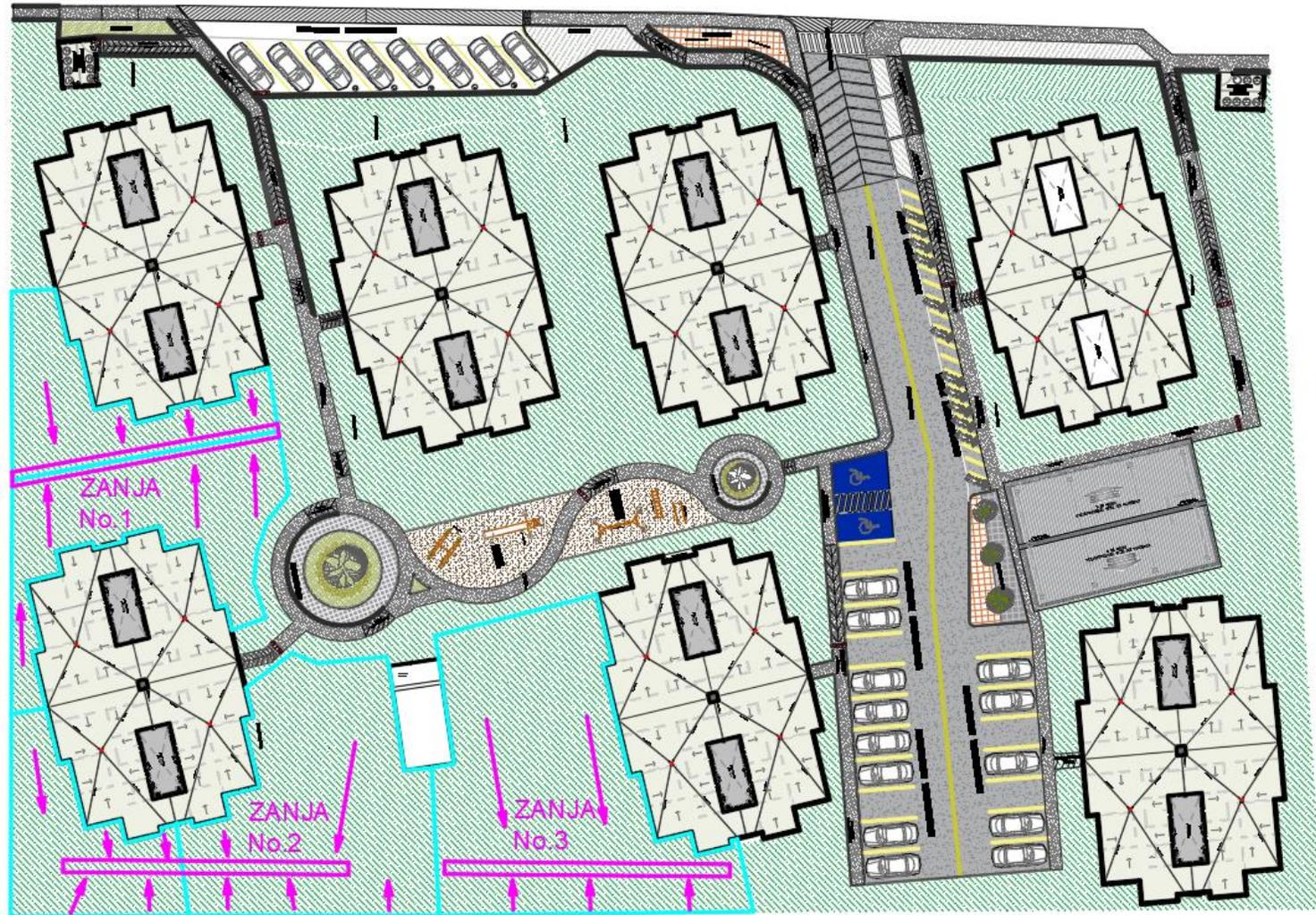
Fuente: Vertin – Zanjas de infiltración, 2016

Estas tipologías permiten la recarga de aguas subterráneas y reducen el volumen que es dirigido al sistema de drenaje convencional, a su vez, asociada a la reducción de contaminantes como sedimentos, metales y patógenos (Calidad del recurso hídrico). No obstante, es importante señalar que estos sedimentos son retenidos en el material particulado y que las zanjas, poseen una capacidad limitada de retención por lo que se hace necesario utilizar estructuras complementarias que capten la escorrentía antes de dirigirse a las zanjas. Otra limitación que presentan la zanja se da por la tasa de infiltración en el área, en estos casos, es necesario la instalación de tuberías para la evacuación del agua almacenada y conectarla al sistema de drenaje general del área analizada.

### 3.2.2.1 Aplicación

Este sistema de drenaje podrá ser implementado en zonas verdes de gran extensión dentro de la urbanización a analizar, teniendo en cuenta que la cobertura máxima por cada una es de 0.20 Ha (2000 m<sup>2</sup>). La distribución de este sistema de drenaje en cada urbanización se puede observar en la Figura 5.

Figura 5 – Zanjas de infiltración (Aplicación)



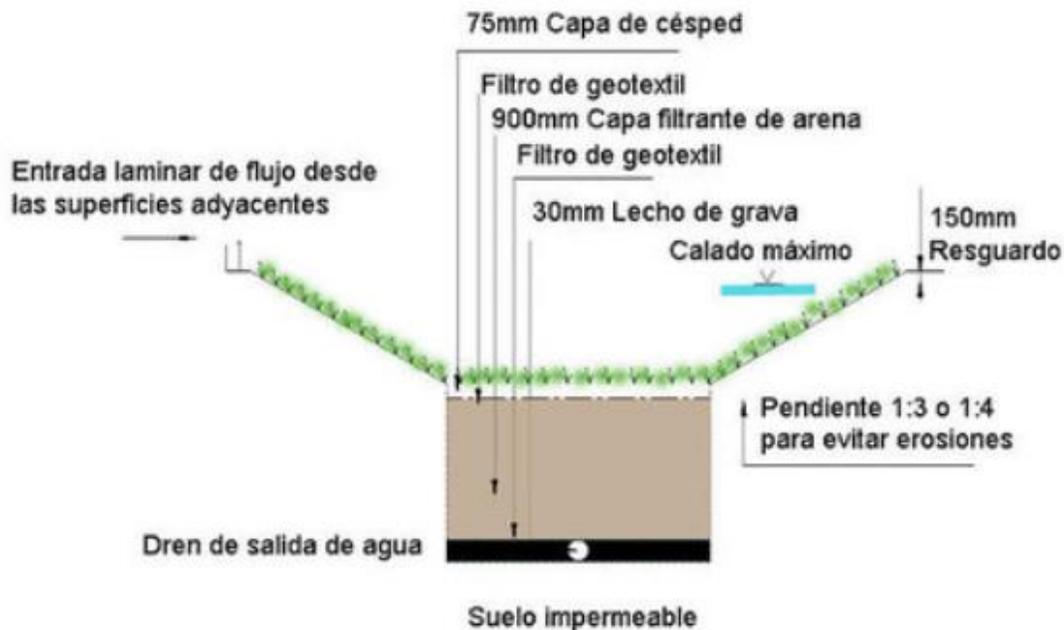
### 3.2.3 Cunetas verdes

Las cunetas verdes son estructuras de extensión geométrica de tipo lineal, conformadas por capa vegetal como se puede observar en la Figura 6. Los parámetros de diseño mínimos son los siguientes:

- Base ancha (Se considera base ancha a la cuneta verde cual tiene una longitud mayor a 0.5 m).
- Talud tendido (Se considera un talud tendido los cuales tienen como mayor criterio 1V:3H).
- Velocidad de diseño admisible menores a 0.5 m/s (conforme NS – 166 EAAB, Criterios para diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS).

Este sistema tiene como función almacenar y transportar la escorrentía generada en un evento de precipitación sobre el área de drenaje y actuar como estructura de sedimentación de las partículas transportadas. Así mismo, permite la infiltración a capas inferiores siendo conformadas por un material permeable.

Figura 6 – Cunetas verdes



Fuente: Vertin – Cunetas verdes, 2016

Existen tres tipos de clase de cunetas verdes:

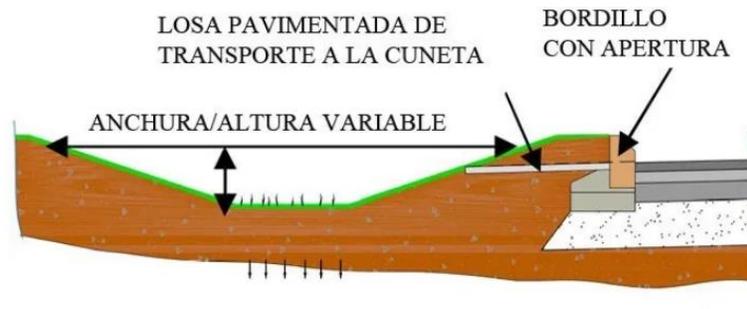
- **Tradicional:** Son canales amplios y poco profundos con vegetación, particularmente efectivos a la hora de transportar y dirigir la escorrentía del área drenada. Pueden ser diseñadas tanto para la infiltración como para la retención, dependiendo del caudal a tratar y de las profundidades de “encharcamiento” apropiadas en el suelo en las que estén ubicadas. (Abellán, 2014).

Tienen la propiedad de tener un tamaño considerablemente pequeño y se utilizan normalmente para drenar pequeños eventos pluviales y en caso de que se presenten avenidas, se tendrán que dotar de estructuras de desbordamiento que logren dirigir el excedente de agua a otros sistemas de drenaje.

Teniendo en cuenta la ubicación de estas cunetas, se deberá implementar una capa impermeable debajo de ellas que impida la infiltración de agentes contaminantes, por ejemplo, si estas se encuentran ubicadas cercanas a una estación de servicio automotriz o gasolinera.

En la Figura 7, se puede observar la composición de la cuneta de tipo tradicional con un ejemplo de su implementación.

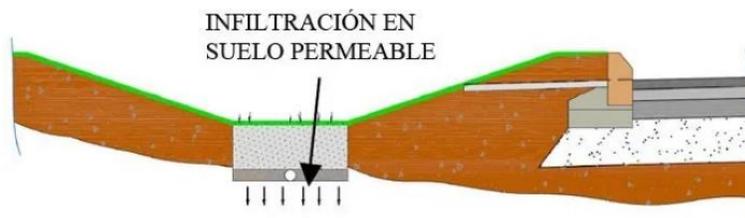
*Figura 7 – Cuneta verde tipo Tradicional*



Fuente: SUDS para carreteras. (Grupo de trabajo escocés SUDS, Gobierno escocés, Agua escocesa, Empresa escocesa, Hogares para Escocia, University of Abertay Dundee and Transport Scotland), 2016

- Secas: Son canales recubiertos de césped (vegetados), que disponen de un lecho filtrante formado por un material muy permeable que permite que todo el volumen captado se infiltre a través del fondo del canal. Se denominan secas porque la mayoría de tiempo no contienen agua y no llegan a “encharcarse” durante periodos húmedos. Se debe tener en cuenta que este sistema, como las cunetas tradicionales, ha de disponer de una lámina impermeable en caso de que haya un foco de contaminación cercano. Este tipo de sistema se puede observar en la Figura 8, en donde se presenta su composición y un ejemplo en su implementación. (Abellán, 2014).

*Figura 8 – Cuneta verde tipo Seca*



Fuente: SUDS para carreteras. (Grupo de trabajo escocés SUDS, Gobierno escocés, Agua escocesa, Empresa escocesa, Hogares para Escocia, University of Abertay Dundee and Transport Scotland), 2016

- Húmedas: Las cunetas húmedas están diseñadas para promover el encharcamiento de manera de que se mejoren los procesos de tratamiento de aguas de escorrentía. Retienen el agua de forma permanente por lo que se debe ejecutar en lugares con el nivel freático elevado o donde el suelo tenga la propiedad hidráulica de ser impermeable. La distribución y composición de este tipo de cuneta se puede observar en la Figura 9.

Figura 9 – Cuneta verde tipo Húmeda

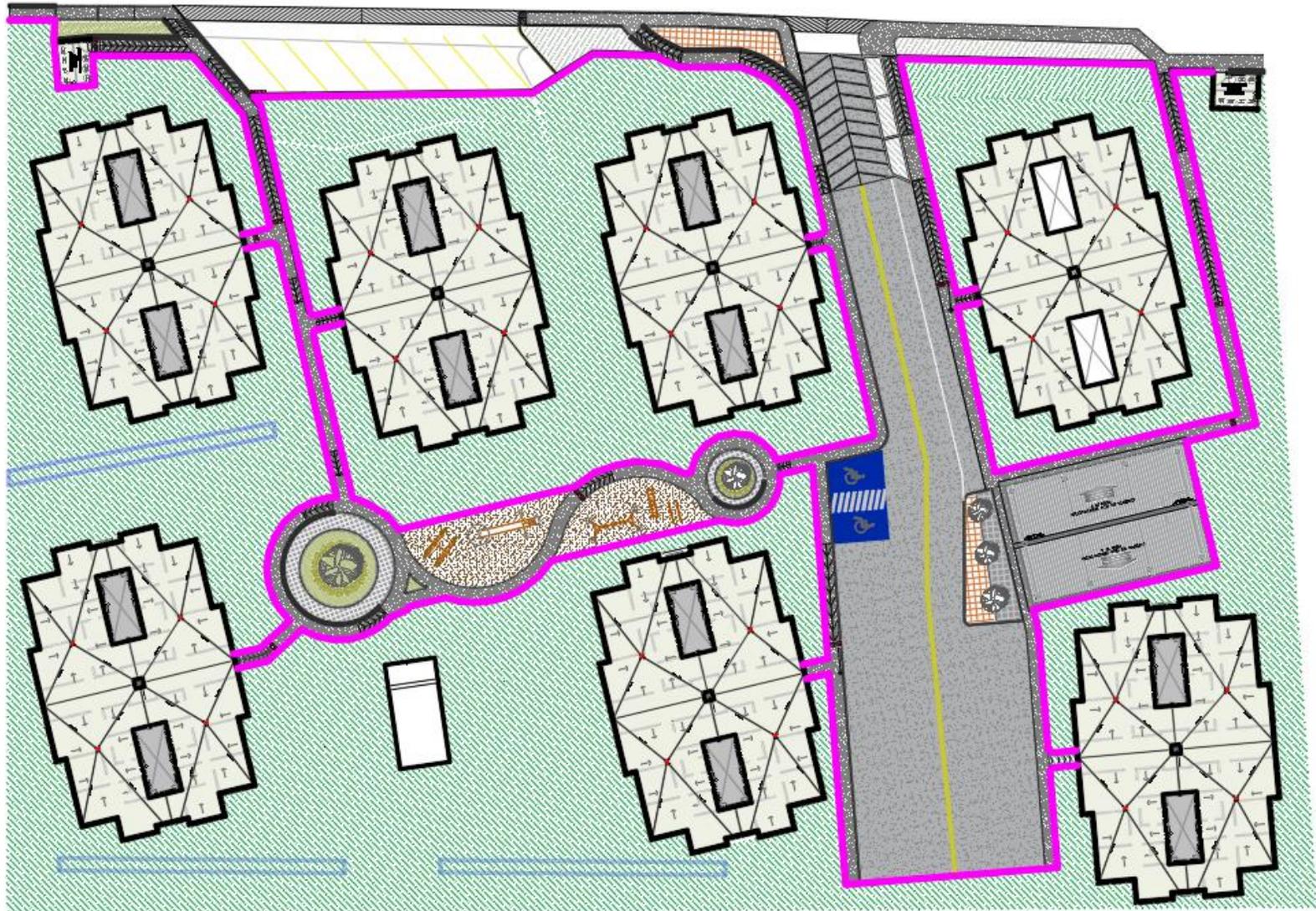


Fuente: SUDS para carreteras. (Grupo de trabajo escocés SUDS, Gobierno escocés, Agua escocesa, Empresa escocesa, Hogares para Escocia, University of Abertay Dundee and Transport Scotland), 2016

### 3.2.3.1 Aplicación

Teniendo en cuenta su funcionalidad y para el objeto de la presente investigación, se dispondrán cunetas verdes de tipo tradicional para el drenaje del bombeo en las zonas de tránsito vehicular, y para el tránsito humano en corredores seguros dentro de la urbanización. En la Figura 10 se observa la disposición de las cunetas verdes, las cuales, están señaladas en color magenta; y en color azul claro se encuentra la implementación de las zanjas de infiltración previamente mencionadas.

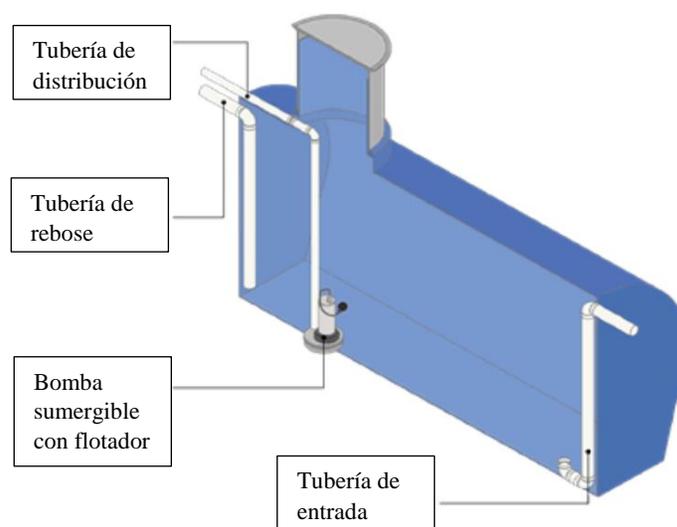
Figura 10- Cunetas verdes (Aplicación)



### 3.3 Tanque de almacenamiento de acopio de agua recolectada

Son estructuras rígidas con diferentes formas según la ubicación de este, las cuales tienen la capacidad de almacenar agua captada proveniente de un evento de precipitación. Su función es la de acopiar agua para abastecer diferentes demandas y brindarle un segundo uso al recurso hídrico. La escorrentía que ingresa a este sistema puede provenir de superficies impermeables como vías techos, cubiertas y canaletas, y su disposición puede ser superficial o subterránea. La composición tipo de este sistema se puede observar en la Figura 11.

*Figura 11 – Tanque de almacenamiento de acopio de aguas lluvias tipo*

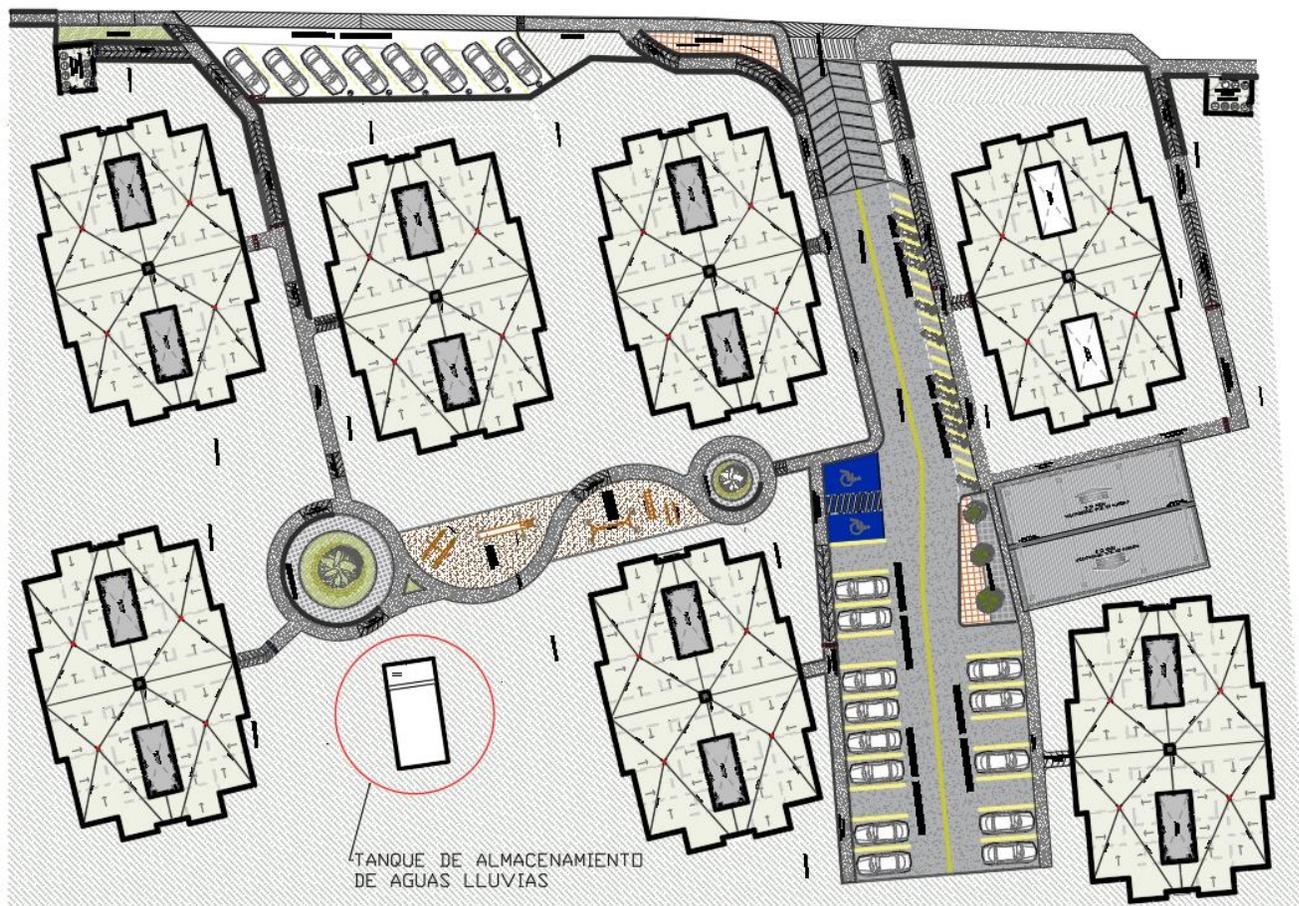


Fuente: Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá (EAAB)

#### 3.3.1 Aplicación

Los diferentes tipos de sistemas de drenaje urbano sostenible pueden emplearse de manera independiente o combinados entre sí con elementos de drenaje convencional, según las características y necesidades particulares del área a analizar. Uno de los objetivos del presente análisis es integrar todos los SUDS de manera de que se genere un acopio significativo de agua precipitada para darle un segundo uso, en donde su ubicación se puede observar en la Figura 12.

Figura 12 – Ubicación tanque de almacenamiento de aguas lluvias provenientes de los SUDS



### 3.4 Storm Water Management Model (SWMM)

El Modelo de la EPA (SWMM) se utiliza para simulaciones de la cantidad y calidad de la escorrentía de agua en áreas principalmente urbanas. Esta herramienta se utiliza para la planificación, el análisis y el diseño relacionados con la escorrentía de aguas pluviales, en sistemas hidráulicos como alcantarillado y otros sistemas de drenaje.

El SWMM se desarrolló para ayudar a respaldar los objetivos locales, estatales y nacionales de gestión de aguas pluviales a fin de reducir la escorrentía mediante la infiltración y la retención, y ayudar a reducir las descargas que causan el deterioro de los cuerpos de agua.

### 3.4.1 Capacidades del modelo

El programa computacional contiene un conjunto flexible de capacidades de modelado hidráulico que se utilizan para enrutar la escorrentía y las entradas externas a través de la red del sistema de drenaje de tuberías, canales, unidades de almacenamiento / tratamiento y estructuras de desvío.

El programa computacional para análisis hidráulico SWMM cuenta con complementos dentro del sistema que ayudan a modelar los siguientes ítems:

- Modelamiento de elementos especiales como unidades de almacenamiento y tratamiento, divisores de flujo, bombas, vertederos y orificios.
- Conducciones tanto abiertas (sistemas a flujo libre) como cerradas (sistemas a presión), así como los canales naturales.
- Modelación de distintos regímenes de flujo, como pueden ser remanso, entrada de carga, flujo inverso y acumulación en superficie.
- Simulación de caudales externos y concentraciones para determinar la calidad del agua superficial, intercambio de caudales con los acuíferos, caudales de infiltración, caudales sanitarios en tiempo seco, aportes externos definidos por el usuario.
- Modelación de precipitaciones variables en el tiempo.

Así como los modelos hidráulicos, el SWMM también tiene la capacidad de desarrollar modelos hidrológicos. Entre éstos se encuentran:

- Precipitaciones variables en el tiempo.
- Evaporación de aguas superficiales estancadas.
- Acumulación y deshielo.
- Entrada del agua de la infiltración en acuíferos.
- Modelo de depósitos no lineales.

### 3.4.2 Aplicaciones típicas de SWMM

El SWMM se ha utilizado en un sinnúmero de redes de evacuación de aguas tanto residuales como pluviales. Entre las aplicaciones más comunes se pueden mencionar:

- Diseño y dimensionamiento de componentes del sistema de drenaje para control de inundaciones.
- Dimensionar las instalaciones de retención y sus accesorios para el control de inundaciones y protección de la calidad del agua.
- Mapeo de llanuras de inundación de sistemas de canales naturales.
- Diseño de estrategias de control para minimizar los desbordamientos de alcantarillados combinados.
- Evaluar el impacto del flujo de entrada y la infiltración en los desbordamientos del alcantarillado sanitario en un sistema.

- Generar cargas de contaminantes de fuentes no puntuales para la asignación de carga de residuos.
- Controlar la escorrentía del sitio, utilizando prácticas de infraestructura verde como controles de baja LID (jardines de lluvia, células de bioretención, cunetas verdes, zanjas de infiltración, techos verdes, desconexión de la cubierta (bajante), barriles de lluvia o cisternas, sistemas continuos de pavimento permeable).
- Evaluar la efectividad de las mejores prácticas de gestión y el desarrollo de bajo impacto para reducir las cargas de contaminantes en climas húmedos (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. , s.f.).

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1 Alcance de análisis**

El proyecto de grado pretende realizar el análisis costo-beneficio de la reutilización del agua lluvia captada a través de la implementación de los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) en una ciudadela ubicada en Bogotá en tres diferentes estratos. Los SUDS que se pretenden implementar para el análisis fueron los descritos en el capítulo anterior.

A continuación, se realiza una descripción de la caracterización del área a analizar, con la premisa de que la ciudadela tipo se implantará en tres lugares diferentes de la ciudad de Bogotá para realizar la comparación en el costo de agua ahorrada por medio del acopio de agua lluvia.

### **4.2 Descripción de la ciudadela a analizar**

#### **4.2.1 Infraestructura que la compone**

##### **4.2.1.1 Generalidades**

La ciudadela consta de diez (10) urbanizaciones (Ver Figura 13). Cada una de ellas está compuesta por viviendas de interés prioritario en estructura de tipo industrializada y cada urbanización contará con: zonas comunes, zonas de parques, zonas de parqueaderos y cuarto de basuras. Con respecto a la cantidad, la ciudadela tendrá una totalidad de mil cuatrocientos (1400) apartamentos.

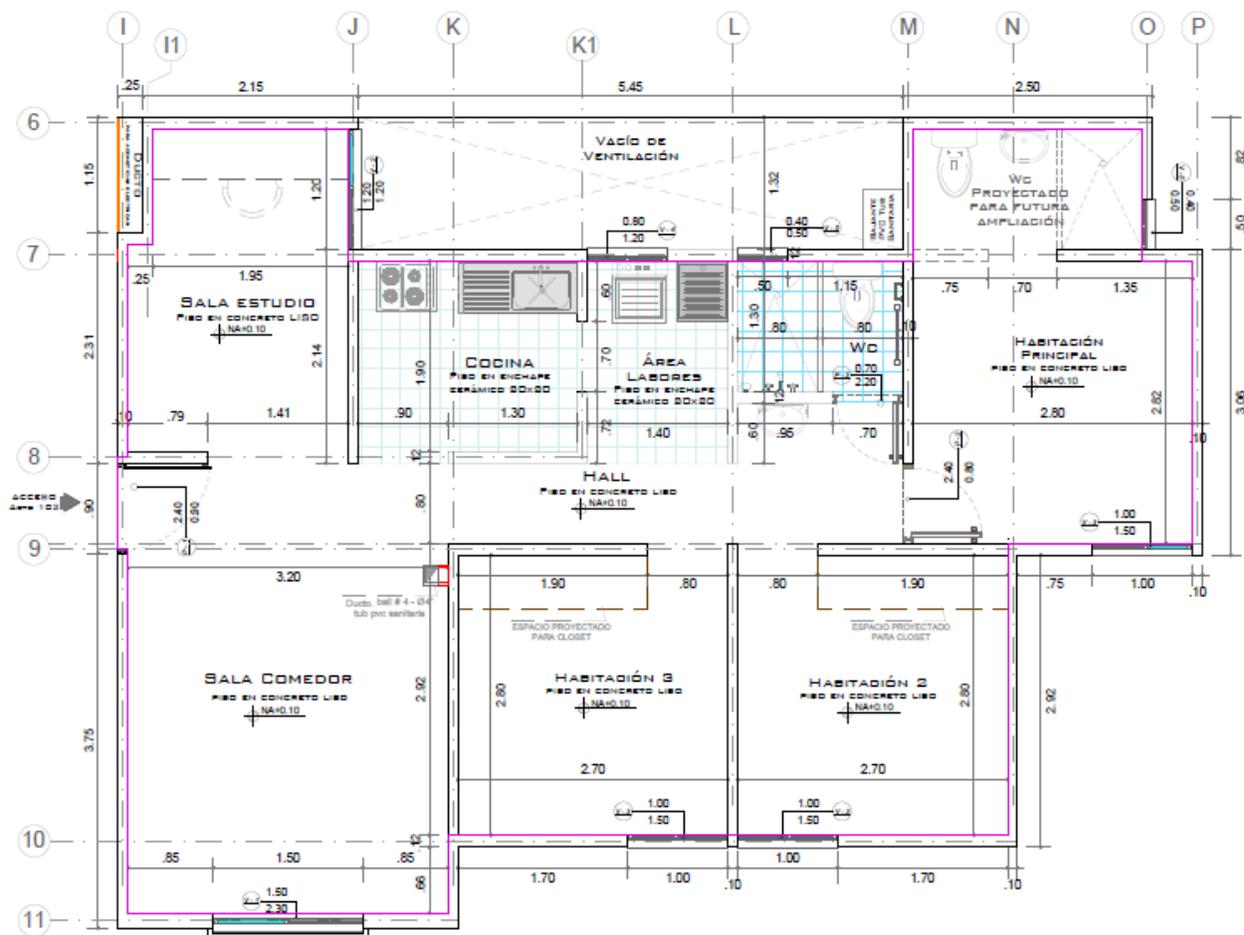
##### **4.2.1.2 Número de unidades por urbanización**

Cada urbanización la componen siete (7) torres típicas de cinco (5) pisos y cuatro (4) apartamentos por piso (ver Figura 14).

##### **4.2.1.3 Descripción de apartamento tipo**

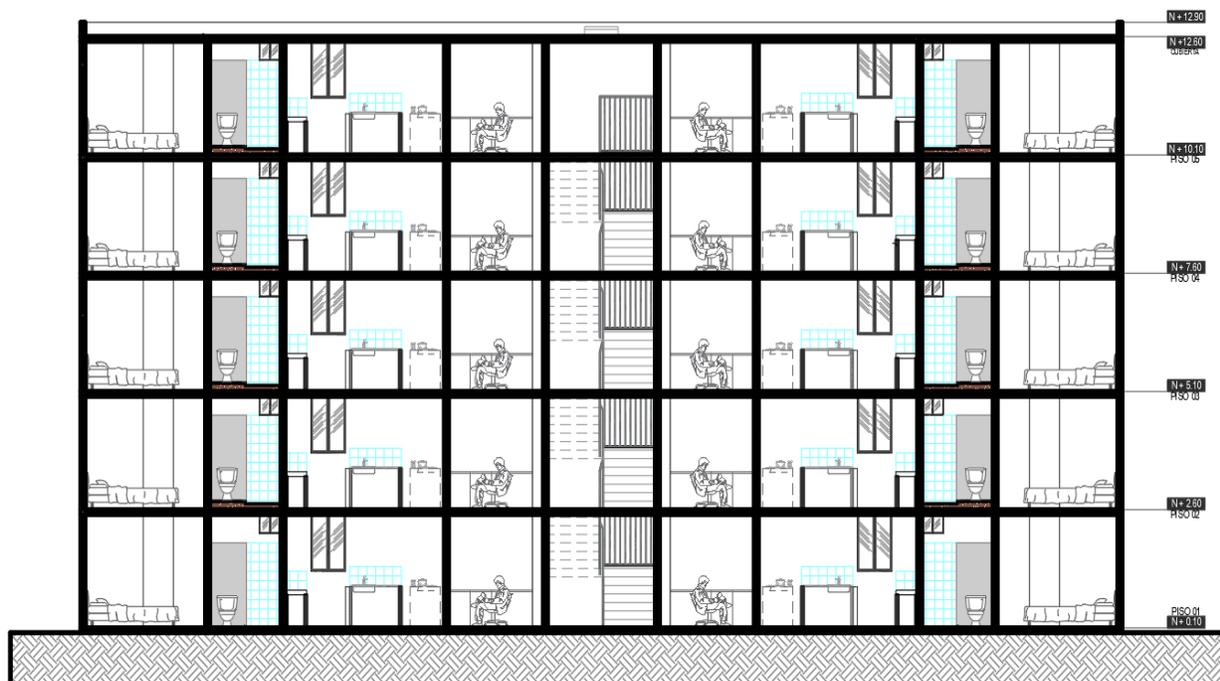
Los apartamentos cuentan con un área privada 64 m<sup>2</sup>. (ver Figura 13) El interior cuenta con tres (3) habitaciones, dos baños, sala comedor, sala de estudio, cocina y zona de labores, de los cuales solo se tendrían acabados en la cocina y en uno de los baños.

Figura 13 – Planta apartamento tipo



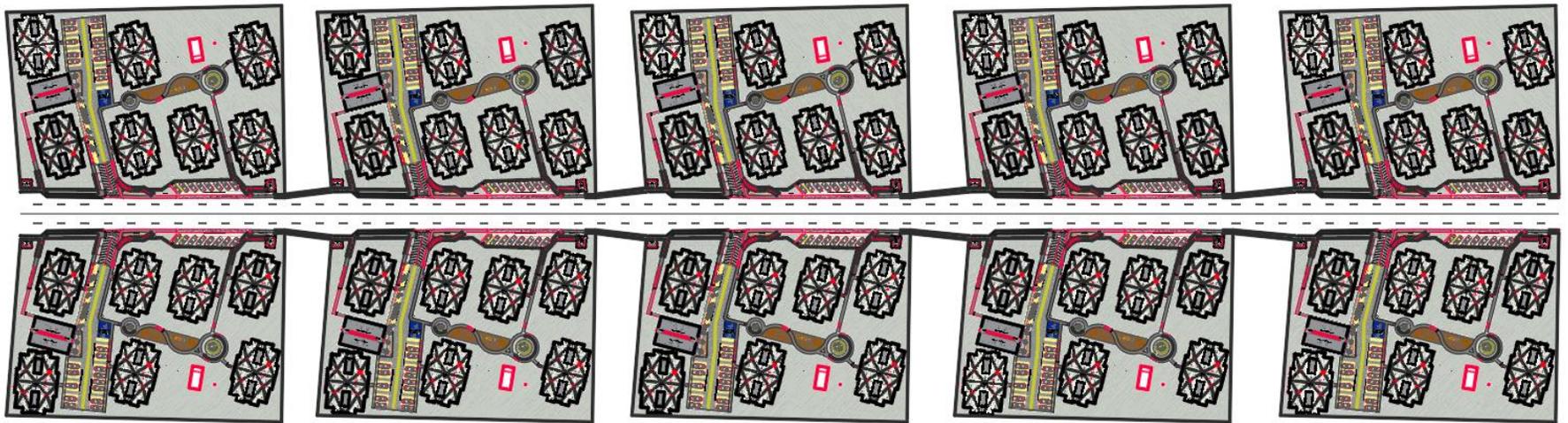
Cada urbanización tendrá un área en total de 0.91 Ha (9100 m<sup>2</sup>) y se tendrá la siguiente distribución de torres:

Figura 14 – Sección torre tipo



SECCIÓN LONGITUDINAL 1-1'

Figura 15- Distribución urbanización



#### 4.2.1.4 Zonas comunes dentro de la urbanización

Dentro del análisis de la composición global del sistema de la urbanización, se encuentran diferentes zonas sociales, que son parte del desarrollo integral del drenaje pluvial analizado. Las zonas sociales están integradas en un solo bloque, el cual cuenta con un (1) piso y lo componen los siguientes habitacionales: portería y salón social.

Adicionalmente, cada urbanización cuenta con un cuarto de basuras, el cual tendrá un drenaje interno para el manejo de los lixiviados y también un drenaje pluvial que se conectará a la red general analizada.

Figura 16 - Zonas Comunes

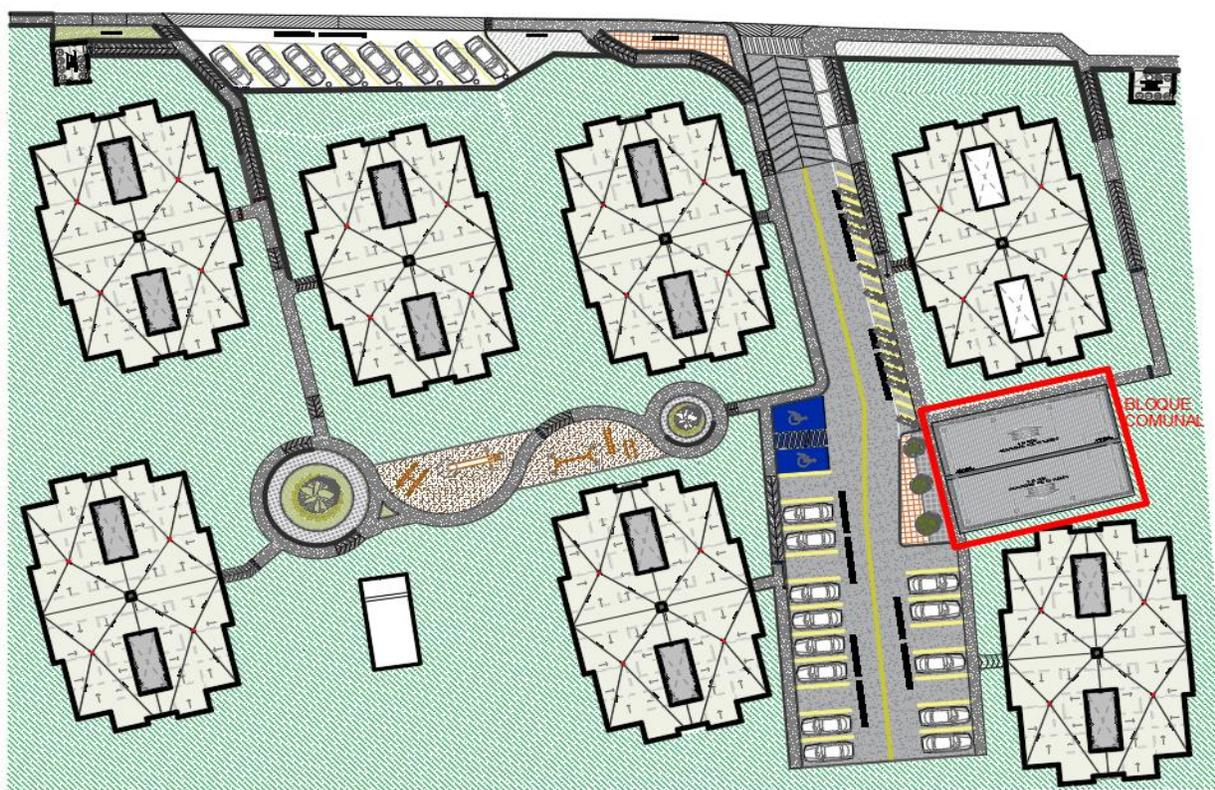
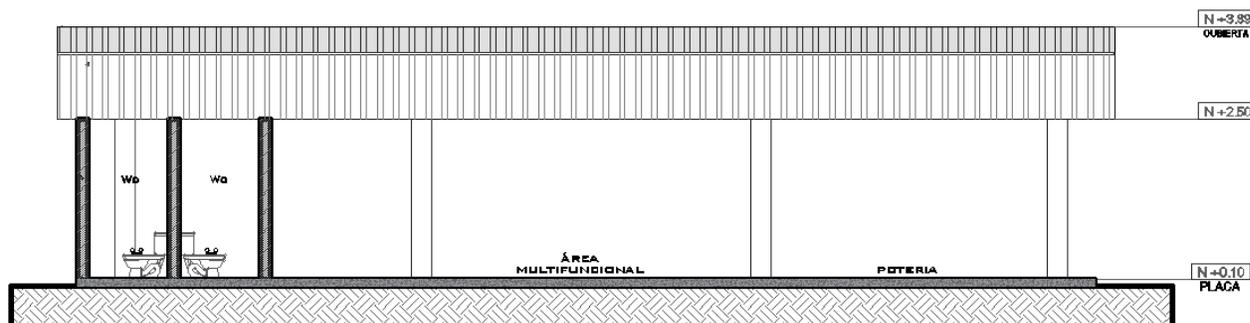


Figura 17- Sección Longitudinal – Edificio comunales



#### 4.2.2 Ubicaciones proyectadas

Con el objeto de poder realizar el análisis entre el costo ahorrado de agua y el costo de la instalación y mantenimiento de los SUDS en sectores diferentes en la ciudad de Bogotá, se determinaron tres ubicaciones de la ciudadela teniendo en cuenta que cada una tiene un estrato social diferente, lo que repercute en un costo por metro cúbico de agua potable diferente por cada ubicación según la Empresa prestadora del servicio (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP).<sup>1</sup> A continuación, se describen las tres ubicaciones proyectadas para el análisis y en la Figura 21, se encuentra la implantación completa.

<sup>1</sup> Se considera estrato social a las agrupaciones de viviendas que tienen una misma característica económica.

Figura 18 – Ubicación No. 1

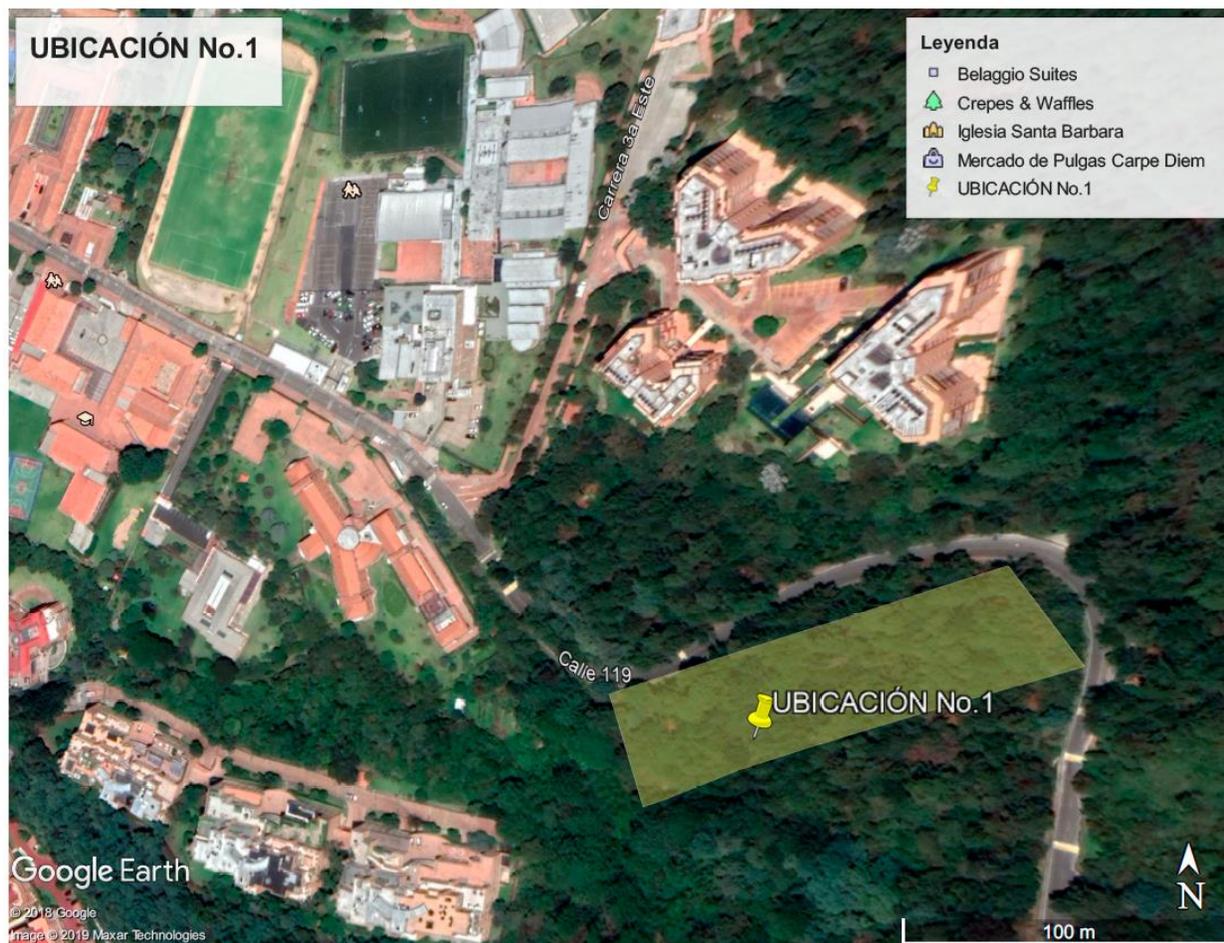


Tabla 1 – Descripción Ubicación No. 1

<b>No. De Ubicación</b>	1
<b>Localidad</b>	Usaquén
<b>Barrio</b>	Usaquén
<b>Estrato</b>	6
<b>Descripción</b>	El predio se encuentra localizado en la calle 119 con carrera 3ª como se observa en la Figura 18

Figura 19 – Ubicación No. 2



Tabla 2 – Descripción Ubicación No. 2

No. De Ubicación	2
Localidad	Barrios Unidos
Barrio	Simón Bolívar
Estrato	4
Descripción	El predio se encuentra localizado sobre la Carrera 60 entre las calles 49a y calle 26 como se observa en la Figura 19.

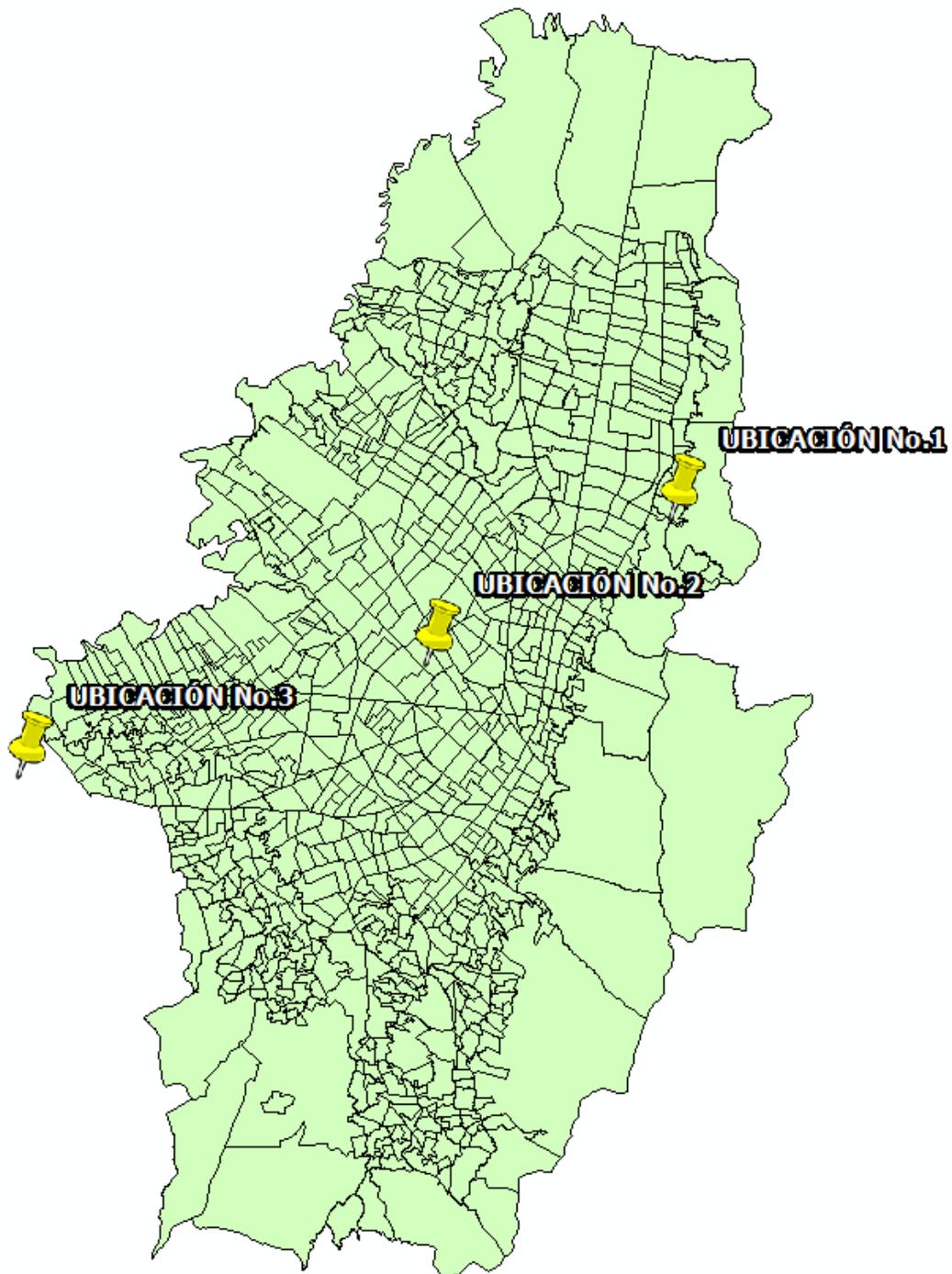
Figura 20 – Ubicación No. 3



Tabla 3 – Descripción Ubicación No. 3

No. De Ubicación	3
Localidad	Bosa
Barrio	Ciudad Verde
Estrato	1
Descripción	El predio se encuentra localizado sobre la transversal 80 entre la diagonal 38 y la diagonal 23 como se observa en la Figura 20.

Figura 21 – Ubicaciones implantadas en el Mapa Catastral de Bogotá



## **5. ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO**

### **5.1 Análisis hidrológico de las zonas proyectadas para ubicar la ciudadela**

Con el objeto de determinar un análisis general del comportamiento hidrológico en las zonas a analizar (tres lugares en donde se ubicaron las ciudadelas), a continuación, se presenta una caracterización hidrológica de estas, con el fin de que sea el insumo principal para el diseño de la red pluvial.

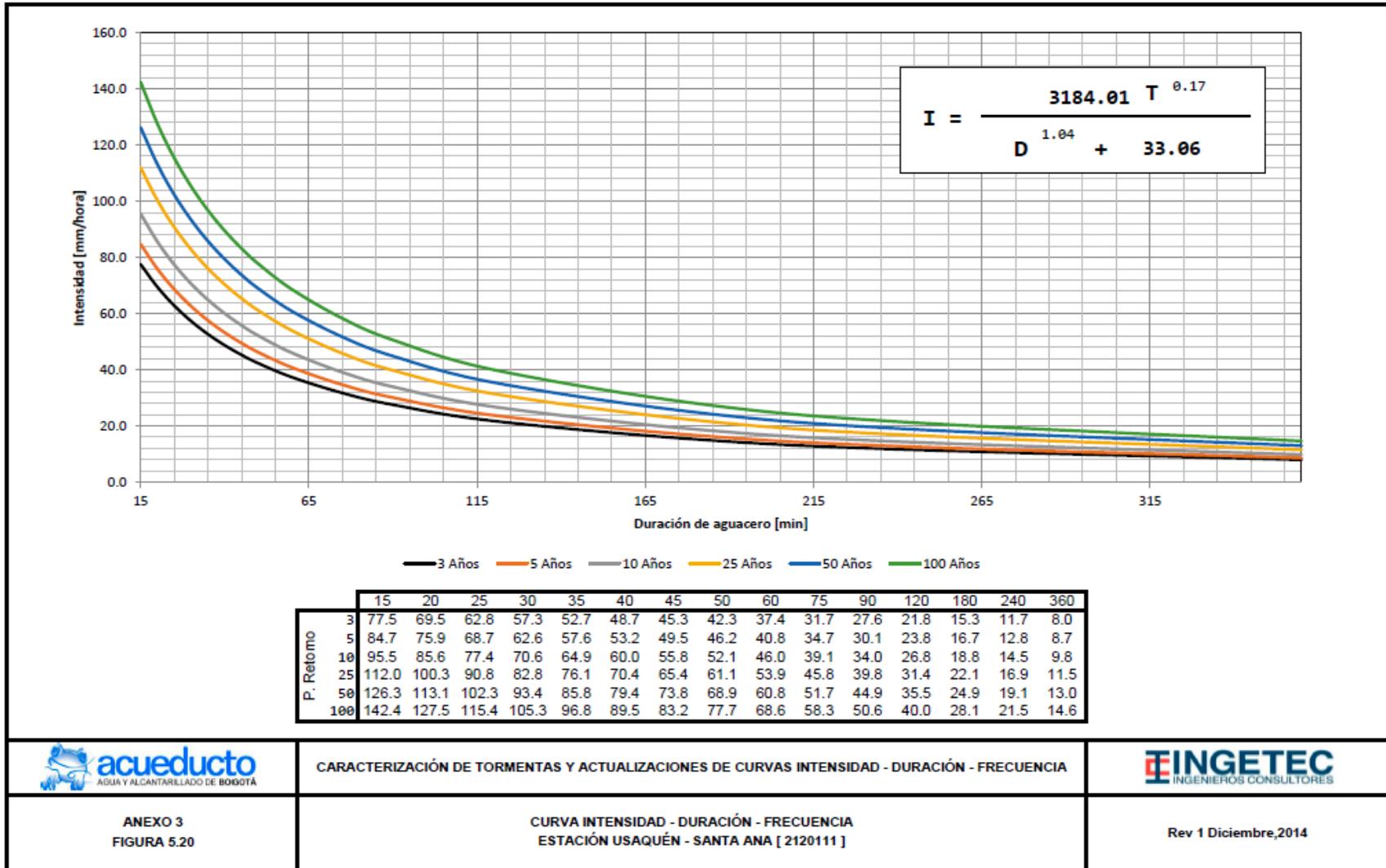
#### **5.1.1 Curva Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF)**

Para realizar el análisis de precipitación, se realizó una investigación de la información disponible por parte de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP (EAAB), en donde se eligió una IDF por cada ubicación tal y como se muestra a continuación. Adicionalmente se exponen las curvas suministradas por EAAB.

Figura 22 – Ubicación IDF Usaquéen – Ubicación No.1



Figura 23 – Curva IDF – Usaquén



CARACTERIZACIÓN DE TORMENTAS Y ACTUALIZACIONES DE CURVAS INTENSIDAD - DURACIÓN - FRECUENCIA



ANEXO 3  
FIGURA 5.20

CURVA INTENSIDAD - DURACIÓN - FRECUENCIA  
ESTACIÓN USAQUÉN - SANTA ANA [ 2120111 ]

Rev 1 Diciembre, 2014

Fuente: EAAB-INGETEC, 2014

Figura 24 - Ubicación IDF Puente Aranda – Ubicación No.2

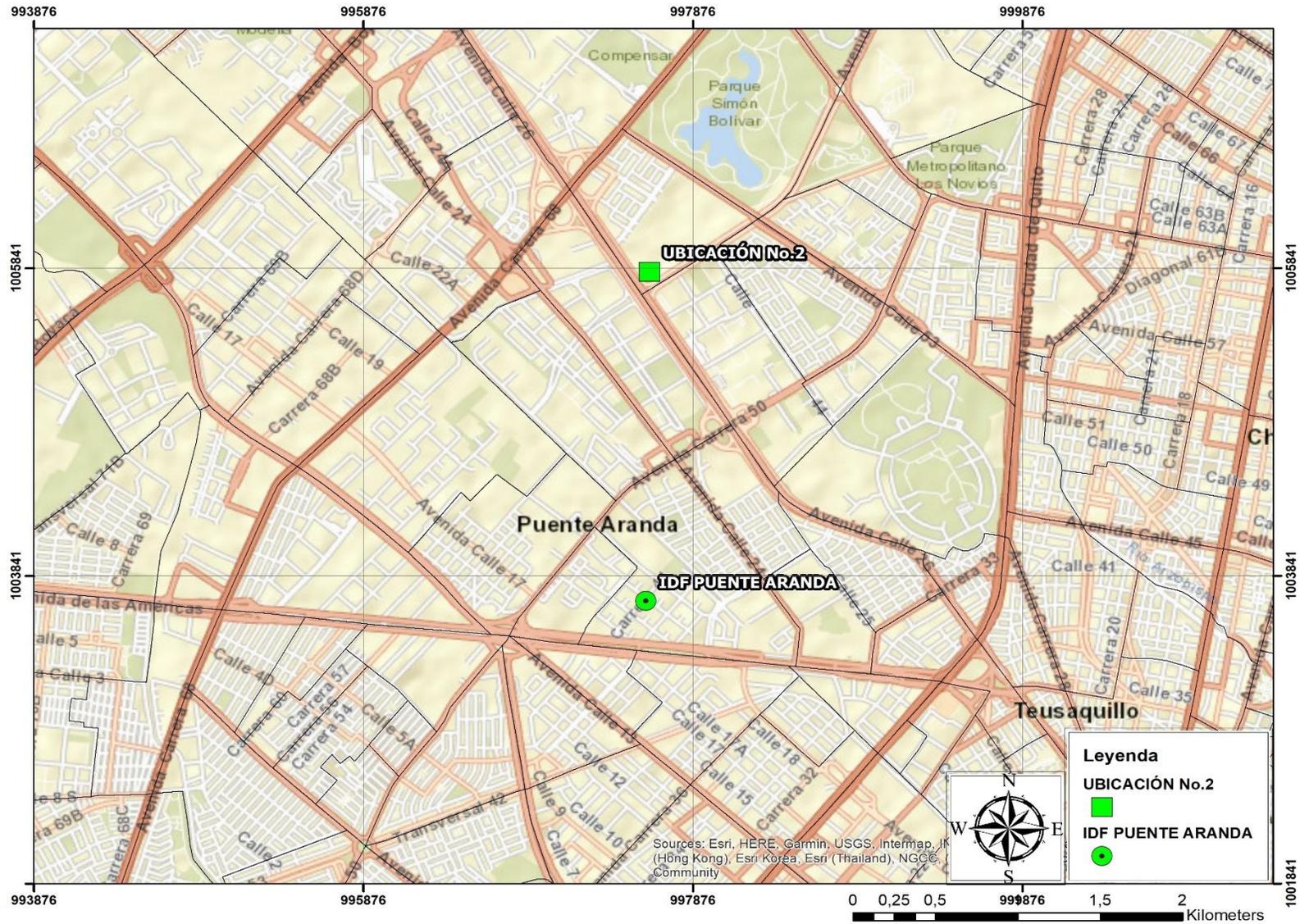
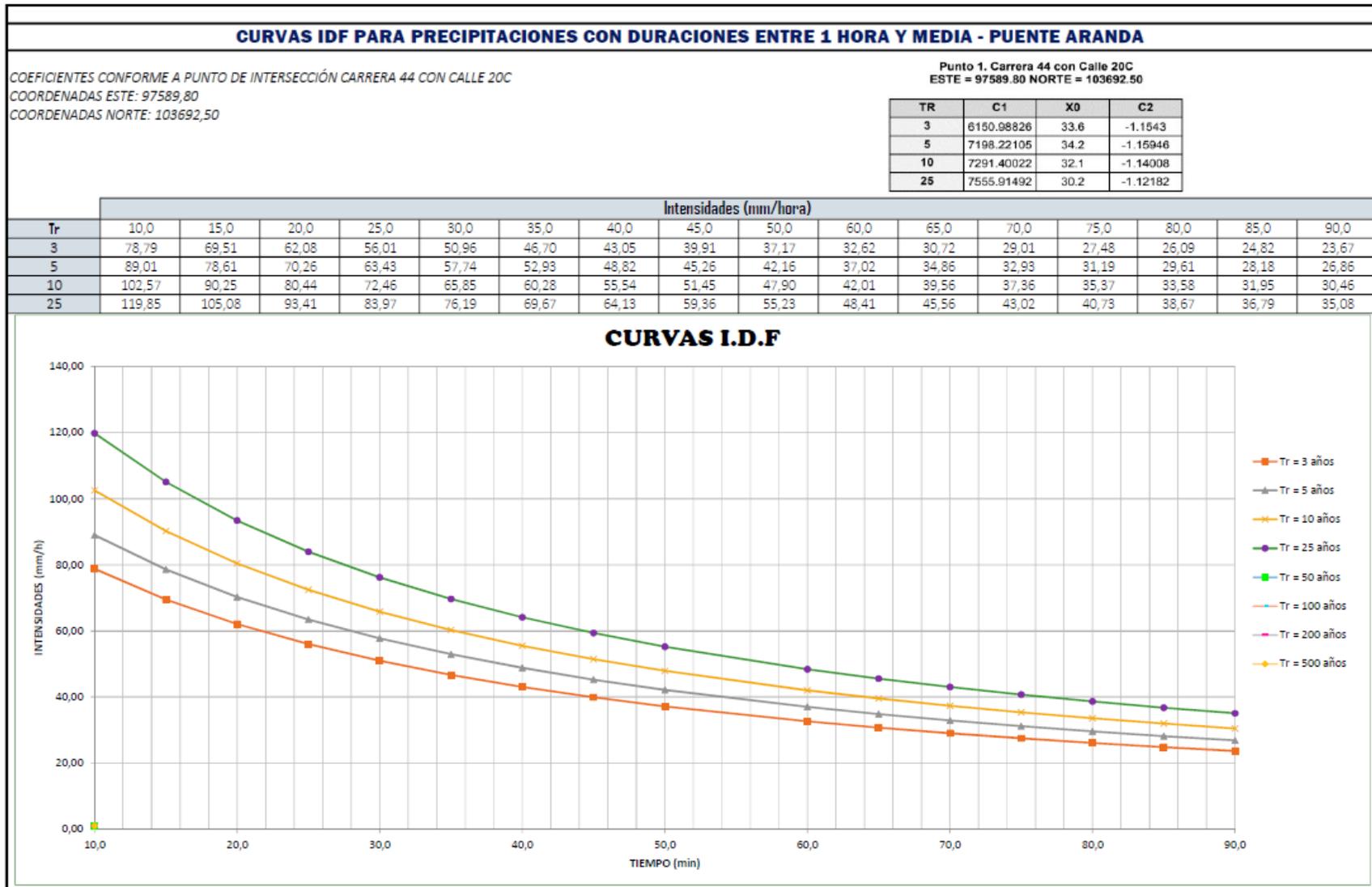


Figura 25 – Curva IDF – Puente Aranda

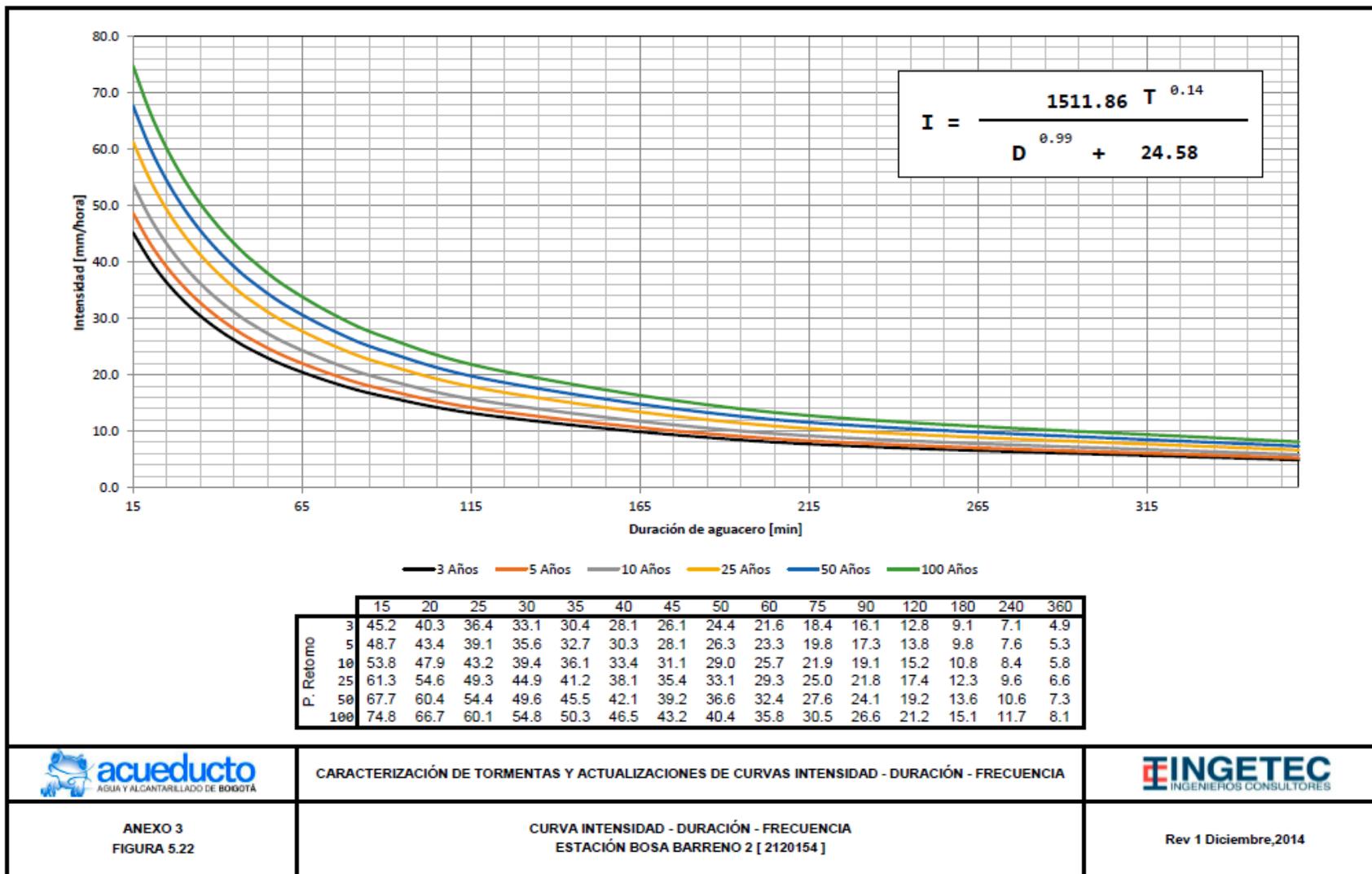


Fuente: EAAB, 2018

Figura 26 - Ubicación IDF Bosa Barreno 2 – Ubicación No.3



Figura 27 – Curva IDF – Bosa Barreno 2



CARACTERIZACIÓN DE TORMENTAS Y ACTUALIZACIONES DE CURVAS INTENSIDAD - DURACIÓN - FRECUENCIA



ANEXO 3  
FIGURA 5.22

CURVA INTENSIDAD - DURACIÓN - FRECUENCIA  
ESTACIÓN BOSA BARRENO 2 [ 2120154 ]

Rev 1 Diciembre, 2014

Fuente: EAAB-INGETEC, 2014

## **5.1.2 Atmósfera – Relacionada a la ciudad de Bogotá**

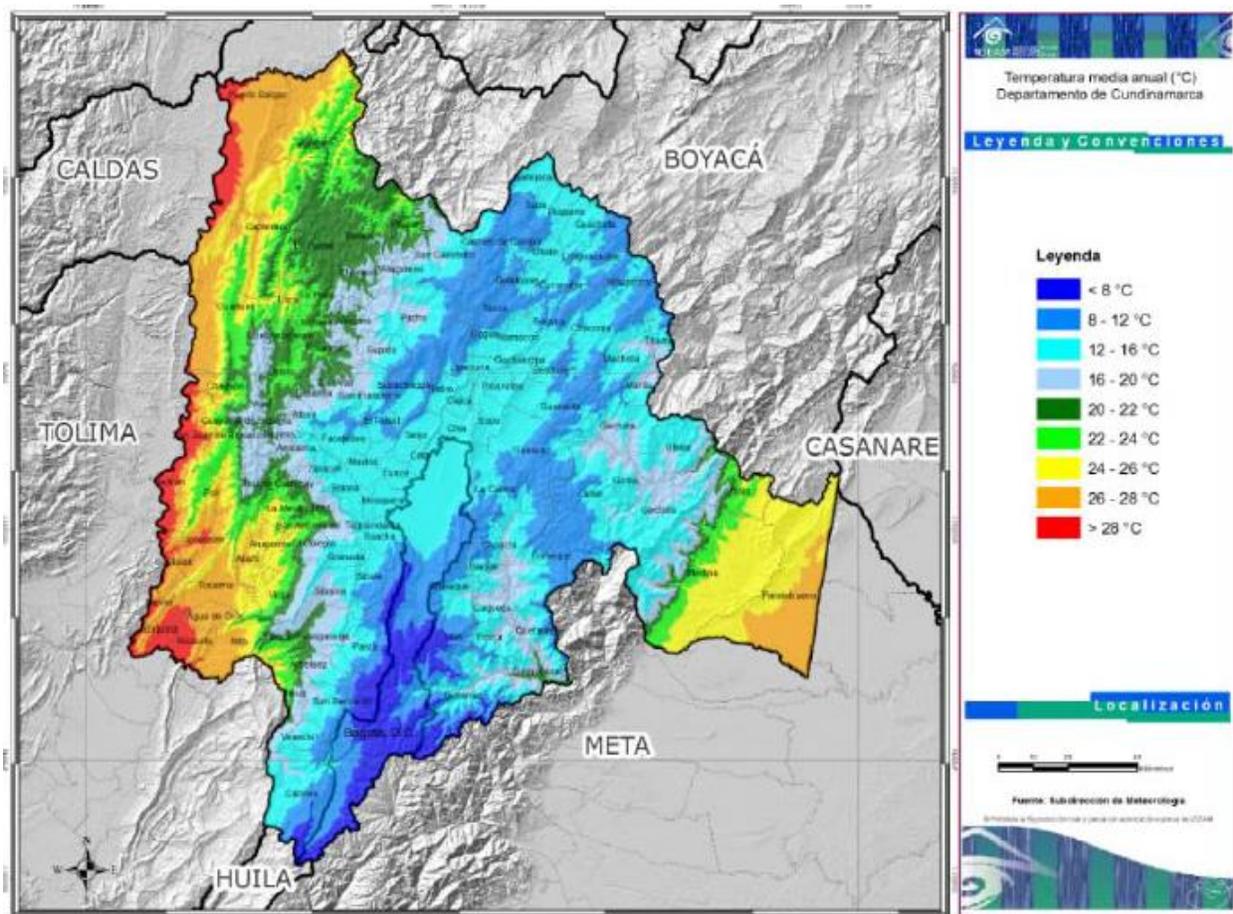
Para generar un análisis global de la caracterización atmosférica de la ciudad de Bogotá, a continuación, se realiza la descripción de los siguientes parámetros con el fin de contextualizar y relacionar su ubicación geográfica. Los criterios meteorológicos seleccionados son: a) temperatura, b) brillo solar, c) velocidad del viento y d) humedad relativa.

### **5.1.2.1 Temperatura**

La temperatura es el grado de calor o calentamiento del aire, y sus variaciones se dan acorde a la altitud y la latitud. La densidad del aire disminuye con la altura, por lo que ésta se expande con menor presión atmosférica y reduce la cantidad de vapor de agua, el gas carbónico y los componentes más pesados. Estas alteraciones influyen en forma negativa en la capacidad de absorción y retención del calor.

Para el caso del estudio en mención, conforme a la ubicación de la ciudad de Bogotá y con base en el Mapa de Temperatura del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se puede determinar que la temperatura máxima promedio en la capital oscila entre los valores de 10.0°C a 13.0°C como se observa en la Figura 28 a continuación:

Figura 28 – Temperatura



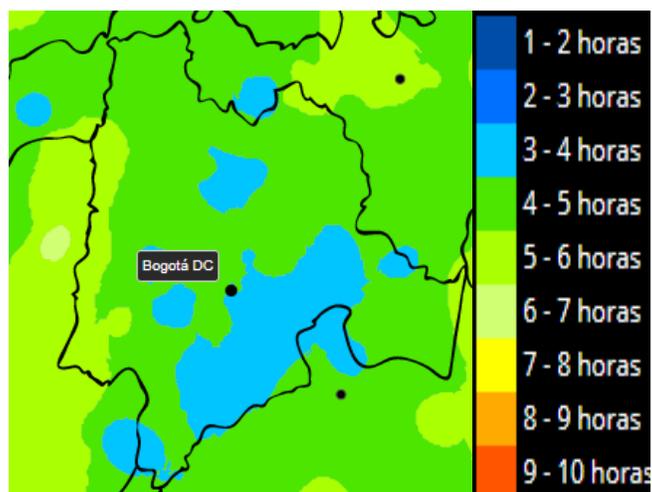
Fuente: IDEAM., 2017.

### 5.1.2.2 Brillo solar

El brillo solar o heliofanía en horas, es un parámetro que representa el tiempo total durante el cual incide luz solar directa sobre algún lugar y son observados entre el alba y el atardecer. El total de horas de brillo solar de un lugar es uno de los factores que determinan el clima en el área a analizar. (Hidromet, 2018)

Para su medición el IDEAM por medio de convenciones en colores, presenta las variaciones desde el blanco, que significa menor intensidad, al rojo que indica una mayor intensidad. El valor suministrado corresponde al número de horas que el promedio durante el día de cada temporalidad se puede observar en el cielo el sol. A continuación, en la Figura 29 se observa el valor de 4 - 5 horas correspondientes a la ciudad de Bogotá.

Figura 29 – Brillo solar

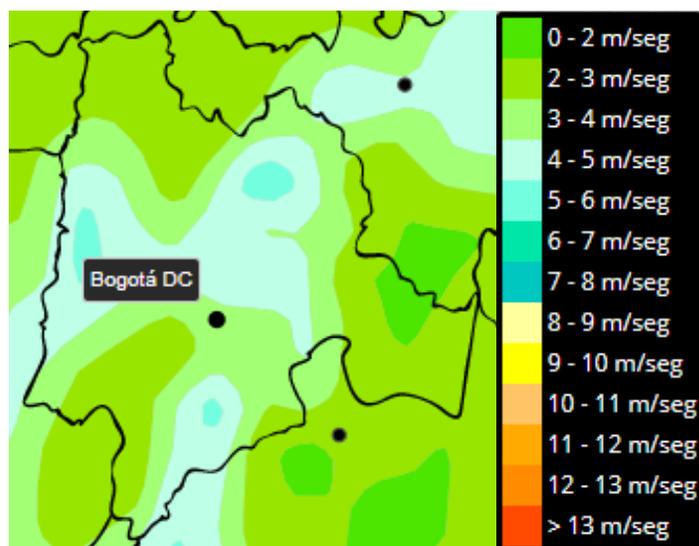


Fuente: IDEAM., 2018.

### 5.1.2.3 Velocidad del viento

Para el análisis de este parámetro, se caracteriza la ciudad de Bogotá conforme a la información suministrada por el IDEAM, en donde se tiene que la velocidad a diez (10) metros de altura es de 4 – 5 m/s como se puede observar en la Figura 30, en la que se observa a su vez la dirección del viento, según la estación climatológica con nombre APTO EL DORADO.

Figura 30 – Velocidad del viento



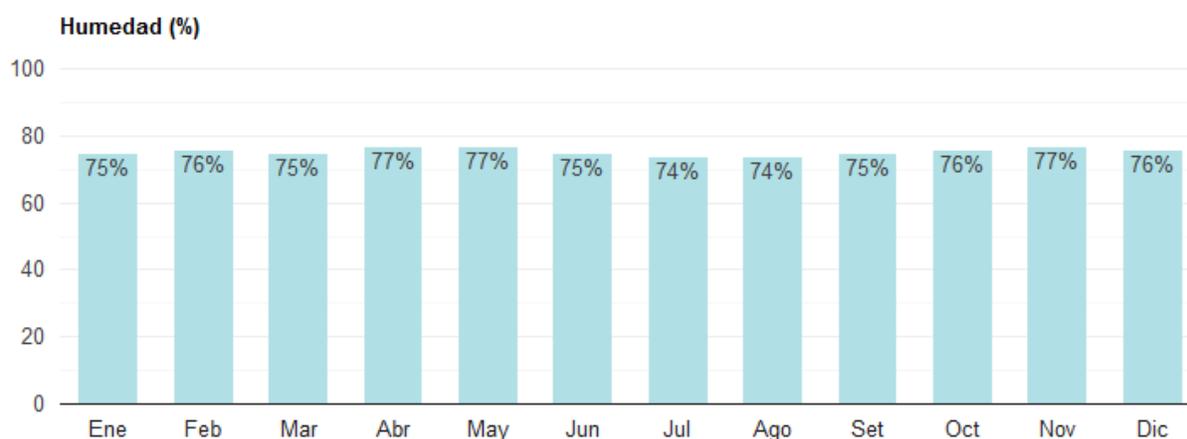
Fuente: IDEAM., 2018.

### 5.2.3.3 Humedad relativa

La humedad relativa es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse a idéntica temperatura. Por ejemplo, una humedad relativa del 70% quiere decir que la totalidad de vapor de agua (el 100%) que podría contener el aire a esta temperatura, solo tiene el 70%. De acuerdo con lo anterior, se presentan los valores de la humedad relativa mensual del año 2018, tal y como se observa en la Figura 31.

*Figura 31 – Humedad relativa*

#### Humedad media Bogotá, Colombia



Fuente: <https://www.weather-col.com/es/colombia/bogota-clima>, 2018

## 5.2 Descripción técnica y aplicación de los SUDS en el proyecto seleccionado

Acorde a lo anterior, se desarrolla el análisis hidráulico por parte de la implementación de los sistemas urbanos de drenaje sostenibles aplicados directamente en el proyecto. El proceso propuesto de análisis es el siguiente:

- Prediseño (Teniendo en cuenta una condición normal sin implementación de SUDS).
- Modelación en el programa computacional SWMM.
- Diseño implantado definitivo.
- Resultados y comentarios.

Cabe resaltar que en este capítulo se hace el análisis de cada uno de los sistemas de drenaje propuestos y se concluye con la identificación de cuáles se implementarán para el sistema general de desagüe pluvial.

## 5.2.1 Diseño pluvial de la urbanización

### 5.2.1.1 Diseño de bajantes de aguas lluvias

Las bajantes de aguas lluvias son las estructuras que conducen el agua captada en las zonas descubiertas y son transportadas hasta los colectores exteriores del sistema interno de cada urbanización. Son una estructura hidráulica con orientación vertical y su medio de conducción es la gravedad.

En primera instancia, se realizó el cálculo y se mostró el paso a paso para la modelación de la Ubicación No.2, correspondiente a la IDF de Puente Aranda, teniendo en cuenta que es la más central de las propuestas y posteriormente se realizó la modelación de las otras dos ubicaciones, en las cuales se exponen los resultados.

#### **Prediseño**

Para determinar el caudal aportante por cada una de las bajantes, se utilizó el caudal instantáneo máximo calculado por el método racional. Esta metodología la está descrita por la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3600000}$$

Donde:

Q = Caudal expresado en m<sup>3</sup>/s.

C = Coeficiente de escurrimiento o escorrentía.

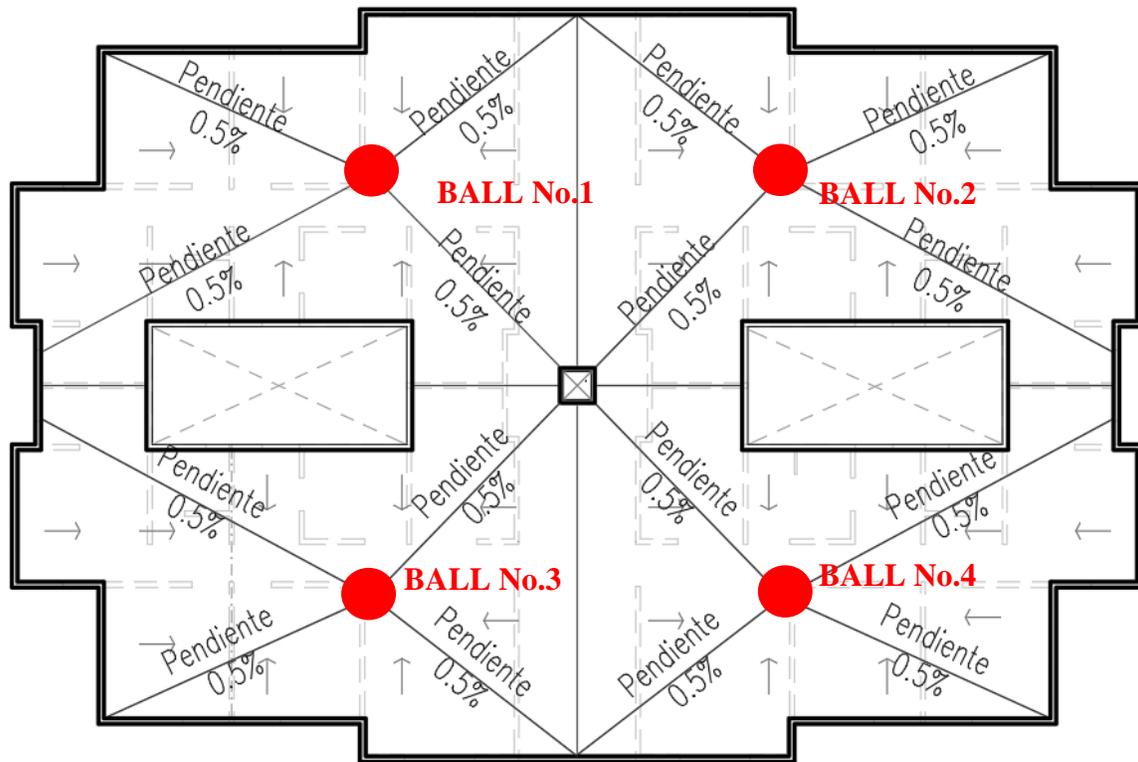
I = Intensidad de la precipitación concentrada en mm/hr.

A = Área de la cuenca hidrográfica delimitada a analizar en m<sup>2</sup>.

A continuación, se presenta el planteamiento del prediseño de las bajantes aplicada a la torre tipo, teniendo en cuenta que se drenará la precipitación que cae en la cubierta en cuatro bajantes (ver Figura 32)

Distribuidas uniformemente (cada bajante tiene la misma área aferente a drenar). El cálculo y dimensionamiento de las bajantes de aguas lluvias (BALL) se pueden observar en la Tabla 4. Para la estimación de la intensidad de la lluvia se utilizará un valor de 100 mm/Hora, que en Colombia -según datos estadísticos- corresponde a una frecuencia de cinco años. (Díaz, 2005)

Figura 32 - Distribución de bajantes de aguas lluvias



### **PLANTA ARQUITECTÓNICA DE CUBIERTA**

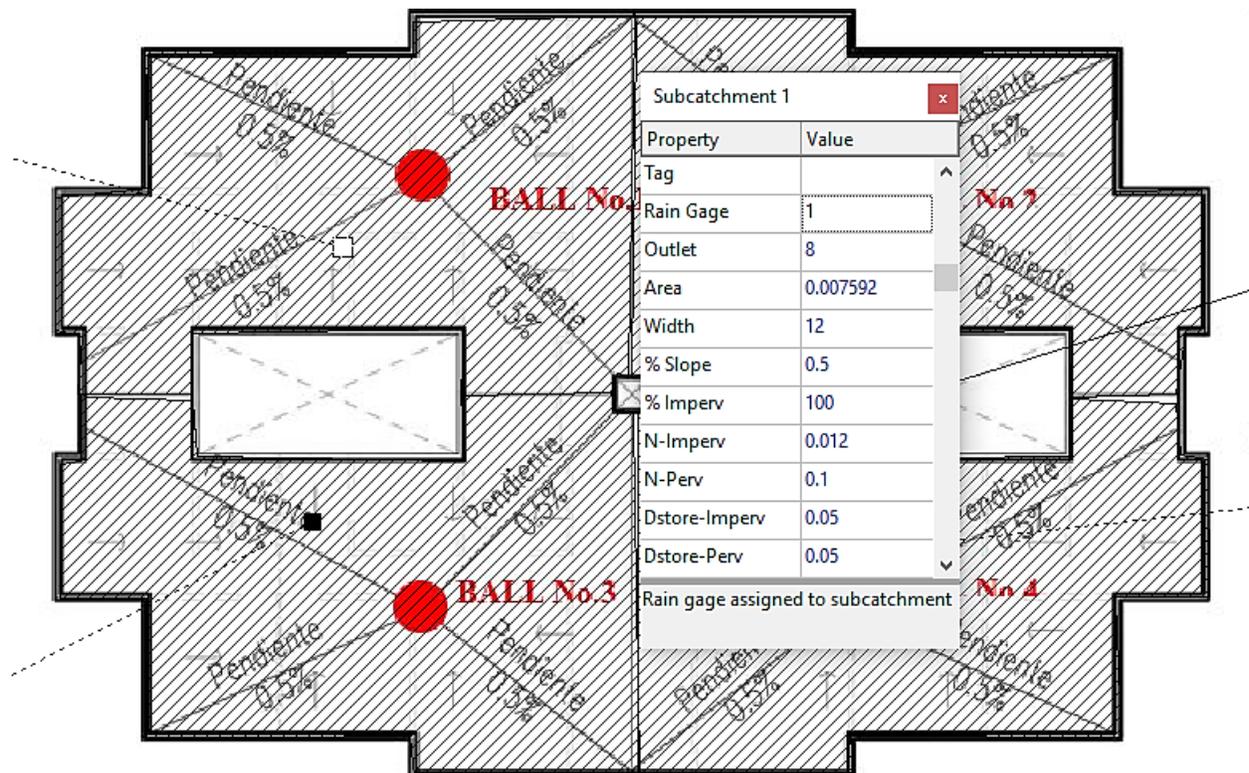
Tabla 4 – Prediseño bajantes aguas lluvias - torre

<b>Área total de la cubierta</b>	303.69 m <sup>2</sup>
<b>No. De bajantes</b>	4.0
<b>Área aferente por bajante</b>	75.9225 m <sup>2</sup>
<b>Intensidad de lluvia</b>	100 mm/hora
<b>Coefficiente de escorrentía</b>	0.95 - Cubiertas (Hidrología en la ingeniería, Germán Monsalve)
<b>Caudal (Lts / seg)</b>	2.00
<b>Diámetro requerido</b>	2.5 Pulgadas
<b>Diámetro de diseño</b>	4.0 Pulgadas

## Modelación en el sistema computacional SWMM

En primer lugar, se debe tener en cuenta que el diseño preliminar no contempla las cubiertas verdes, por lo que se ingresan las características de las áreas aferentes a cada una de las bajantes de la torre tipo como se muestra en la Figura 33. Las cuatro áreas tienen el mismo valor (0.007592 ha), por lo que se realiza el análisis para una sola bajante.

Figura 33 – Ingreso de datos de área aferente correspondiente a cada bajante



A continuación, en la Figura 34 se muestra el hidrograma de intensidades que se evaluó teniendo en cuenta la IDF PUENTE ARANDA (Ver Figura 23), el cual se asoció directamente al modelo en cuestión con una duración de la tormenta de una hora y media (01:30).

Figura 34 – Ingreso de datos – Serie de tiempo de intensidades.

Time Series Editor ×

Time Series Name

Description

Use external data file named below

Enter time series data in the table below

No dates means times are relative to start of simulation.

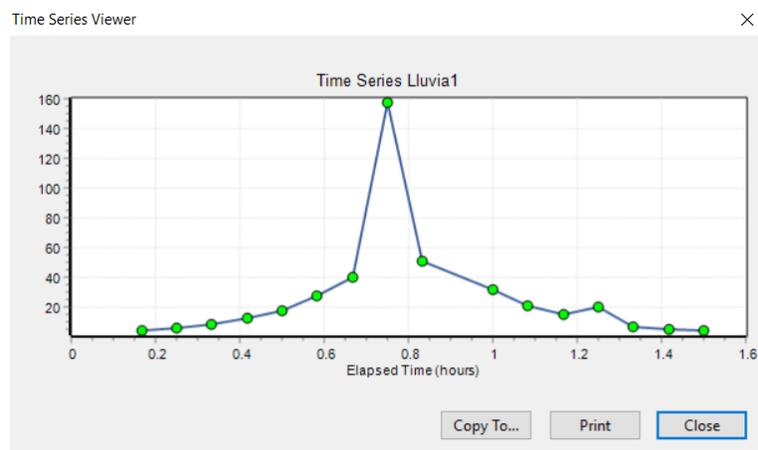
Date (M/D/Y)	Time (H:M)	Value
	0:10	4.5
	0:15	6.06
	0:20	7.92
	0:25	12.21
	0:30	17.5
	0:35	27.71
	0:40	39.79
	0:45	157.58
	0:50	50.95
	1:00	31.73
	1:05	21.14

View

OK

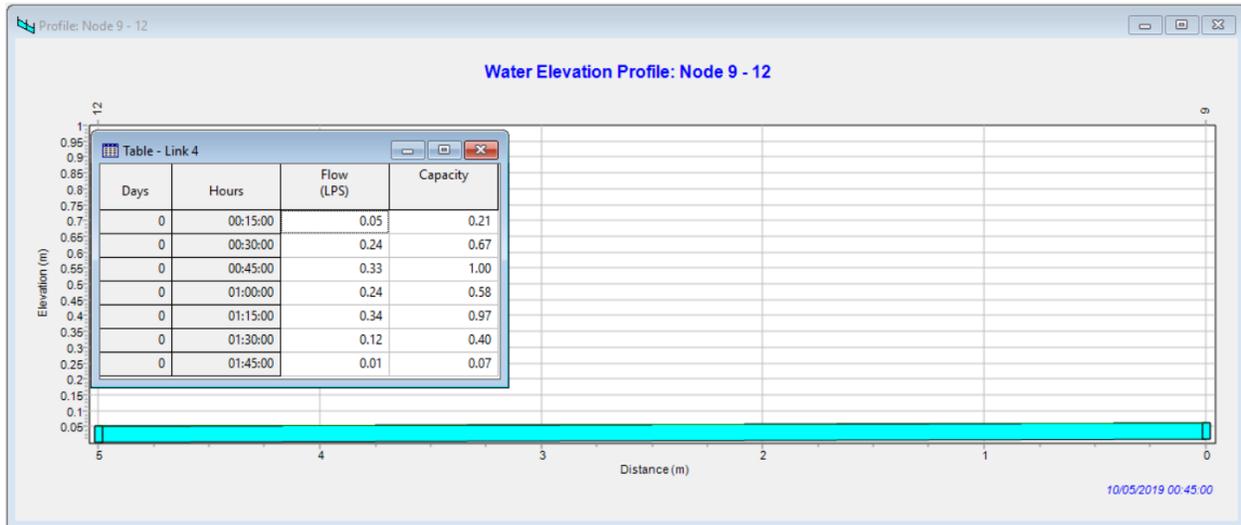
Cancel

Help



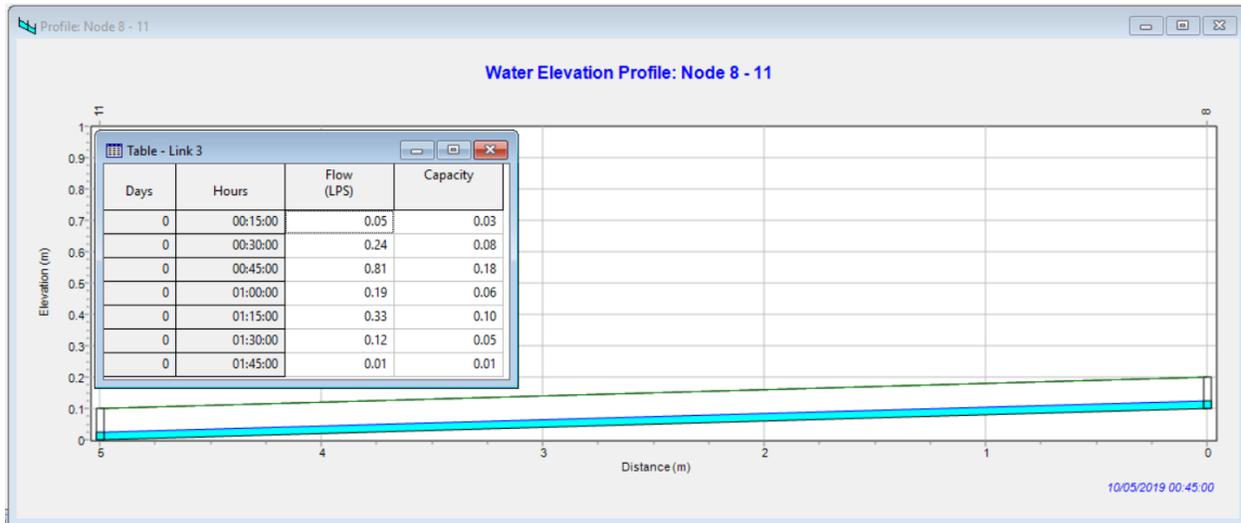
Teniendo en cuenta las propiedades de la tubería correspondiente a la bajante de aguas lluvias, en el prediseño se tomó un valor de un diámetro de dos (2) pulgadas, por lo que se tienen los siguientes resultados.

*Figura 35– Resultados prediseño bajantes de aguas lluvias*



Como referencia se evaluó el prediseño anterior y se procedió a realizar un aumento en el diámetro nominal de la tubería destinada para transportar el agua captada en la totalidad del área de la cubierta de la torre tipo. El diámetro elegido es de cuatro (4) pulgadas lo que corresponde a 0.1016 m. Teniendo en cuenta el anterior criterio, varía el diámetro en el modelo y los resultados se pueden observar en la Figura 36. Cabe denotar que comercialmente, en la mayoría de las ocasiones, para áreas pequeñas a drenar en cubiertas se adopta un diámetro de cuatro pulgadas a pesar de tener una capacidad hidráulica sobredimensionada, ya que la obstrucción con materiales externos puede ocasionar que parte de su capacidad nominal se pierda.

Figura 36 – Resultados diseño definitivo bajantes de aguas lluvias – Sin cubiertas verdes



## Resultados y comentarios

Con el objeto de realizar un prediseño de las bajantes de agua lluvia, se tiene un panorama de los diámetros máximos que se implementarán sin tener cubiertas verdes. En el siguiente apartado se presenta el diseño de las cubiertas verdes con lo que se llegará al diseño definitivo de estas tuberías.

### 5.2.1.2 Cubiertas verdes

Las cubiertas verdes o techos verdes son un sistema de drenaje que permite captar lluvia a través de su superficie que funciona como un microhábitat, y que, además, ayuda a regular las temperaturas en las edificaciones lo que permite mejorar la calidad del agua y la parte estética de una edificación.

### Prediseño

Para el prediseño de las cubiertas verdes se generó estimación positiva teniendo en cuenta la Figura 37, definiendo así que el tipo de cubierta que se implantará es con plantas de tipo Helecho (plantas sin semillas ni raíces) con una pendiente del 2.00 % y una profundidad de sustrato de 8.00 cm. El tipo de la planta es extensiva, ya que presentan buenos resultados en la reducción de la escorrentía que se puedan presentar en las cubiertas. En la parte inferior de la cubierta se consideró instalar un geotextil no tejido (NT2000) y una lámina drenante para garantizar que el sustrato no se lave cuando ocurra cualquier evento de lluvia.

Figura 37- Porcentaje de reducción de escorrentía

Tipo de cubierta	Volumen Total ( $10^{-5}$ m <sup>3</sup> /)	Caudal máximo ( $10^{-5}$ m <sup>3</sup> /s)	Tiempo al centroide (min)	Tiempo de retraso (min)	Porcentaje de reducción (%)
Helecho 5%	485	0.11	105	26	66%
Helecho 2%	347	0.06	104	24	80%
Control 2%	689	0.31	79	N/A	N/A
Sedums 2%	391	0.10	115	36	68%
Sedums 5%	507	0.11	105	26	64%

N/A= No Aplica

Fuente: Evaluación de una cubierta verde como sistema de drenaje urbano sostenible, Eduardo León, Bogotá D.C. 2014

### Modelación en el sistema computacional SWMM

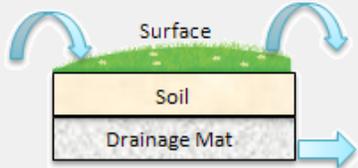
Una vez ya establecidos los parámetros en el prediseño sobre las cubiertas verdes se simuló en el modelo de SWMM; para la parte de la capa vegetal quedará de la siguiente forma (ver *Figura 38* y *Figura 39*).

Figura 38- Cubiertas verdes

LID Control Editor

Control Name:

LID Type:



Surface | Soil | Drainage Mat

Berm Height (in. or mm)

Vegetation Volume Fraction

Surface Roughness (Mannings n)

Surface Slope (percent)

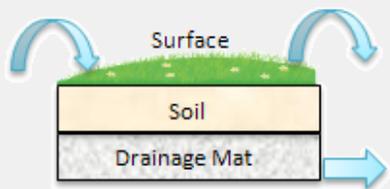
OK Cancel Help

Figura 39- Propiedades del suelo

LID Control Editor

Control Name:

LID Type:



Surface | Soil | Drainage Mat

Thickness (in. or mm)

Porosity (volume fraction)

Field Capacity (volume fraction)

Wilting Point (volume fraction)

Conductivity (in/hr or mm/hr)

Conductivity Slope

Suction Head (in. or mm)

OK Cancel Help

Figura 40 - Propiedades del manto drenante

LID Control Editor

Control Name:

LID Type:

Surface | Soil | **Drainage Mat**

Thickness (in. or mm)

Void Fraction

Roughness (Mannings n)

OK Cancel Help

Aplicando los anteriores parámetros mencionados al área correspondiente a una bajante (ver Figura 33) y con un porcentaje de ocupación de un 26.3 % (ver Figura 41), y con los datos de lluvia anteriormente mencionados (ver Figura 34) se obtienen los siguientes resultados:

Figura 41- Porcentaje del área de cubierta verde

LID Usage Editor

LID Control Name

LID Area

Area of Each Unit (sq ft or sq m)

Number of Units

% of Subcatchment Occupied

Surface Width per Unit (ft or m)

% Initially Saturated

% of Impervious Area Treated

% of Pervious Area Treated

Send Drain Flow To:  
(Leave blank to use subcatchment outlet)

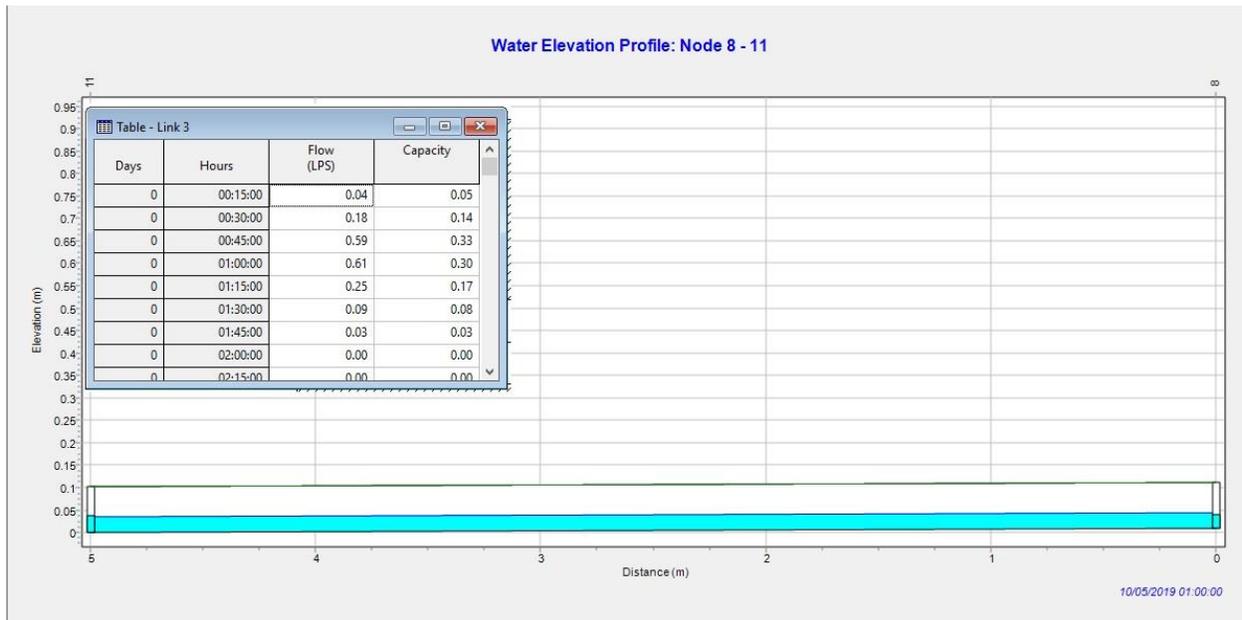
LID Occupies Full Subcatchment

Return all Outflow to Pervious Area

Detailed Report File (Optional)

OK Cancel Help

Figura 42- Resultados Cubierta Verde



### Resultados y comentarios

Conforme a lo anteriormente mencionado y expuesto, las bajantes de aguas lluvias se logran optimizar a un diámetro de 4", por lo que se determina que el diámetro de estos conductos no se reduce a pesar de la implementación de las cubiertas verdes. El esquema de la instalación de las bajantes se puede observar en la Figura 43.

Figura 43- Instalación definitiva de bajantes de aguas lluvias



### 5.2.1.3 Zanjas de infiltración

Esta tipología o estructura hidráulica de SUDS tiene como finalidad el transporte, almacenamiento, infiltración y mejora de la calidad de agua de escorrentía debida a la precipitación en el área a analizar. Fundamentalmente, consiste en una excavación lineal y de geometría rectangular o trapezoidal, la cual es rellena con material granular o geo celdas, que tienen la finalidad de ser el filtro para sedimentos y de partículas gruesas. Adicionalmente, usualmente, también son cubiertas por geotextiles las paredes laterales y son conectadas con estructuras anexas para que se incorporen a un sistema general de drenaje.

### Resultados y comentarios

Teniendo en cuenta que, para realizar los criterios de prediseño, modelación en el sistema computacional SWMM y el diseño implantado definitivo en la urbanización contempla una caracterización completa de los suelos en donde se implementaría esta estructura, por lo cual, no se procedió al implementar esta tipología de SUDS.

### 5.2.1.4 Cunetas verdes

Esta tipología o estructura hidráulica de SUDS está compuesta por canales lineales poco profundos cubiertos por césped y otra vegetación. Permite recolectar y/o

conducir escorrentía, lo que ayuda de gran manera la remoción de sólidos suspendidos del agua transportada ya que la cobertura vegetal cumple el fin de ser un filtro natural. Adicionalmente, los procesos de bio – filtración e infiltración presentes a lo largo de estos sistemas permiten el tratamiento del agua de escorrentía.

## Prediseño

Teniendo en cuenta las recomendaciones en la Figura 44 se procedió a hacer el pre-dimensionamiento de las cunetas verdes. Para ello, se consideró que para el caudal de diseño se calculará para un periodo de retorno de 3 o 5 años de acuerdo con la norma de EAAB “NS-085 Criterios de diseño de sistemas de alcantarillado”. Para el presente caso se proponen 3 años.

*Figura 44- Parámetros de diseño de cunetas verdes*

Estructura	Parámetros	Valor	Unidades
Cuneta verde	Pendiente lateral del canal Z:1	> 3:1	Relación H:V
	Pendiente de diseño (S)	> 0.01	m/m
	Velocidad de diseño ( $V_f$ )	< 0.5	m/s
	Profundidad de flujo (d)	< 0.3	m
	Ancho de fondo de la cuneta ( $W_f$ ) (Geometría trapezoidal)	> 0.5	m
	Número de Froude ( $F$ )	0.5	Adimensional

Fuente: Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá (EAAB)

Para determinar el caudal aportante para la cuneta, se utilizará el caudal instantáneo máximo calculado por el método racional. Esta metodología la gobierna la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3600000}$$

Donde:

Q = Caudal expresado en m<sup>3</sup>/s.

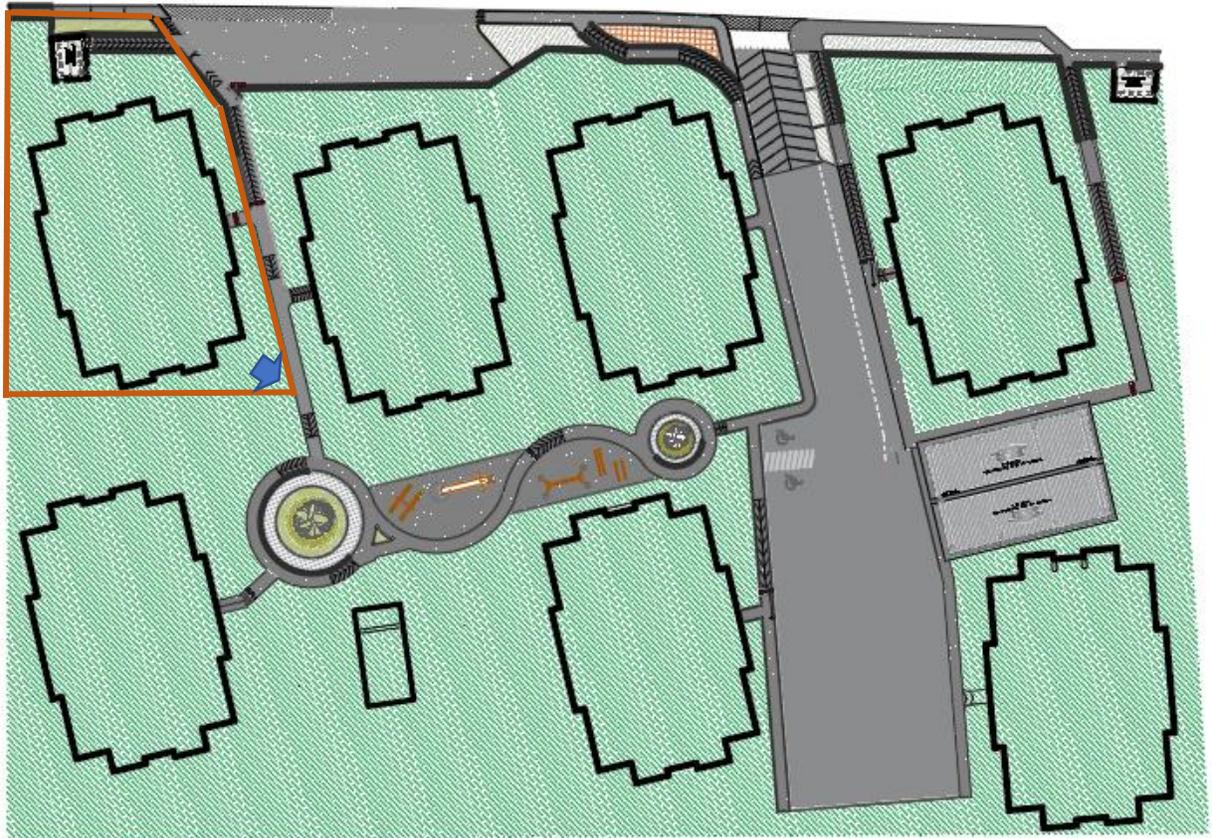
C = Coeficiente de escurrimiento o escorrentía.

I = Intensidad de la precipitación concentrada en mm/hr

A = Área de la cuenca hidrográfica delimitada a analizar en m<sup>2</sup>.

A continuación, se presenta el planteamiento del prediseño de las cunetas para una torre y asumiendo que las áreas aportantes son iguales para las demás torres, contemplando que se drenará la precipitación que cae sobre el área mostrada en la Figura 45. El cálculo del caudal de diseño se puede observar en la Tabla 5.

*Figura 45- Área para drenaje de cunetas*



Una vez el caudal de diseño este calculado, por medio de una operación algebraica, se iguala con la ecuación de Manning, y así mismo, se definieron las propiedades geométricas de la cuneta verde. Según los parámetros antes mencionados, los resultados se pueden observar en la Tabla 5.

*Tabla 5 - Prediseño cuneta verde*

<b>Caudal</b>	3.65 Lps
<b>Coefficiente de Manning [n]</b>	0.03
<b>Co</b>	1.00
<b>Talud [z]</b>	3.00
<b>Pendiente [So]</b>	0.01 m/m
<b>Y</b>	0.025 m
<b>Bo</b>	0.5 m
<b>Velocidad</b>	0.258 m/s
<b>Froude</b>	0.55

Con la premisa de que se deben cumplir los requerimientos hidráulicos anteriormente descritos, el parámetro del número de Froude debería ser menor a 0.5. Como se pudo observar en el prediseño, el valor no se encuentra tan lejos de los parámetros establecidos (0.55), por lo cual es considerado como aceptable, teniendo en cuenta que al realizar la modelación los valores puedan variar.

### **Modelación en el sistema computacional SWMM**

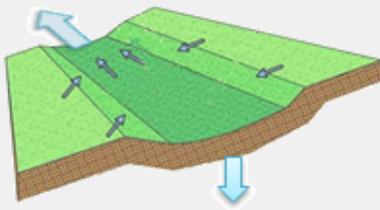
Para realizar la modelación en el programa computacional SWMM, se ingresaron las características de las cunetas previamente calculadas en el prediseño, tal como se muestran en la Figura 46.

Figura 46- Modelo cunetas verdes

LID Control Editor

Control Name:

LID Type:



Surface

Berm Height (in. or mm)

Vegetation Volume Fraction

Surface Roughness (Mannings n)

Surface Slope (percent)

Swale Side Slope (run / rise)

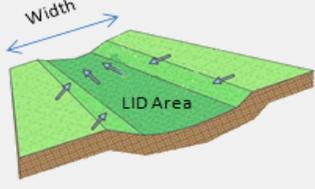
OK Cancel Help

Posteriormente, se procedió a la asignación al área del que se va a captar el agua para la cuneta como se observa en la Figura 47 .

Figura 47 - Asignación al área de drenaje

LID Usage Editor

LID Control Name:



Detailed Report File (Optional)

LID Occupies Full Subcatchment

Area of Each Unit (sq ft or sq m)

Number of Units

% of Subcatchment Occupied

Surface Width per Unit (ft or m)

% Initially Saturated

% of Impervious Area Treated

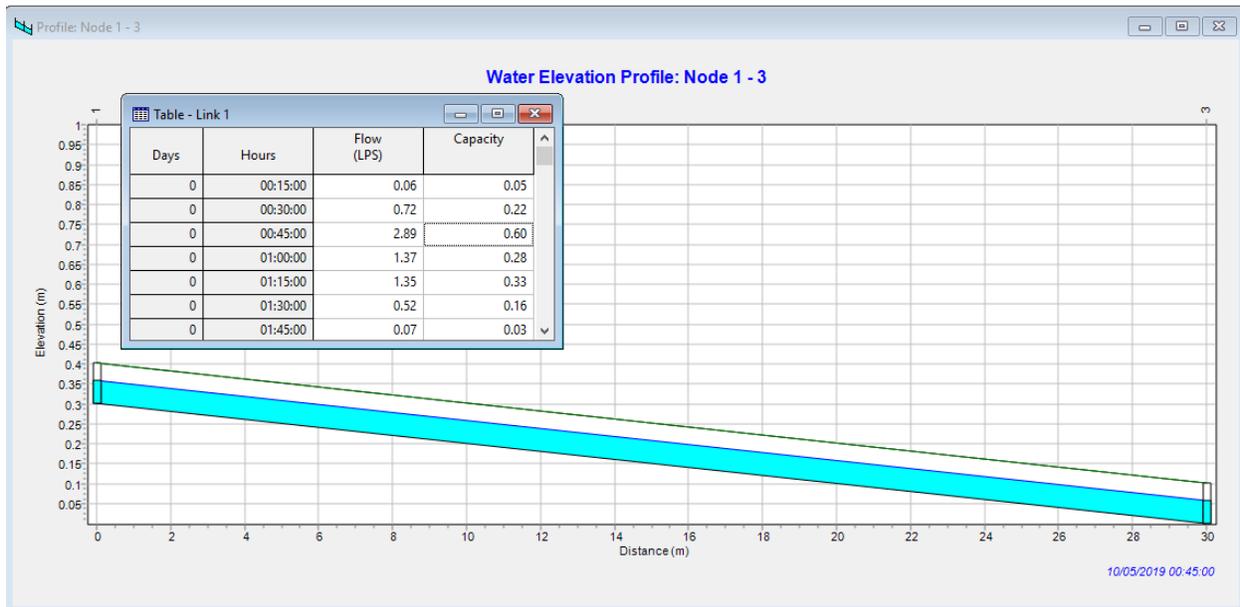
% of Pervious Area Treated

Send Drain Flow To:  
(Leave blank to use subcatchment outlet)

Return all Outflow to Pervious Area

OK Cancel Help

Figura 48 - Resultados Cunetas Verdes



Como se muestra en la Figura 48 se obtiene un caudal de 2.89 Lps y un funcionamiento del 60% de la tubería que captara el agua con un diámetro nominal de 4”.

#### 5.2.1.5 Diseño de tanque de almacenamiento de acopio agua lluvia captada

Tipología de SUDS o estructura hidráulica tiene como función la retención de agua de escorrentía para ser almacenada. El volumen acopiado puede ser utilizado en sistemas para abastecer consumo de agua no potable o ser dispuesto directamente en cuerpos receptores o en sistemas convencionales de drenaje. La escorrentía que ingresa a esta tipología puede provenir de superficies impermeables como vías, techos, cubiertas y canaletas, y su disposición final puede ser superficial o subterránea.

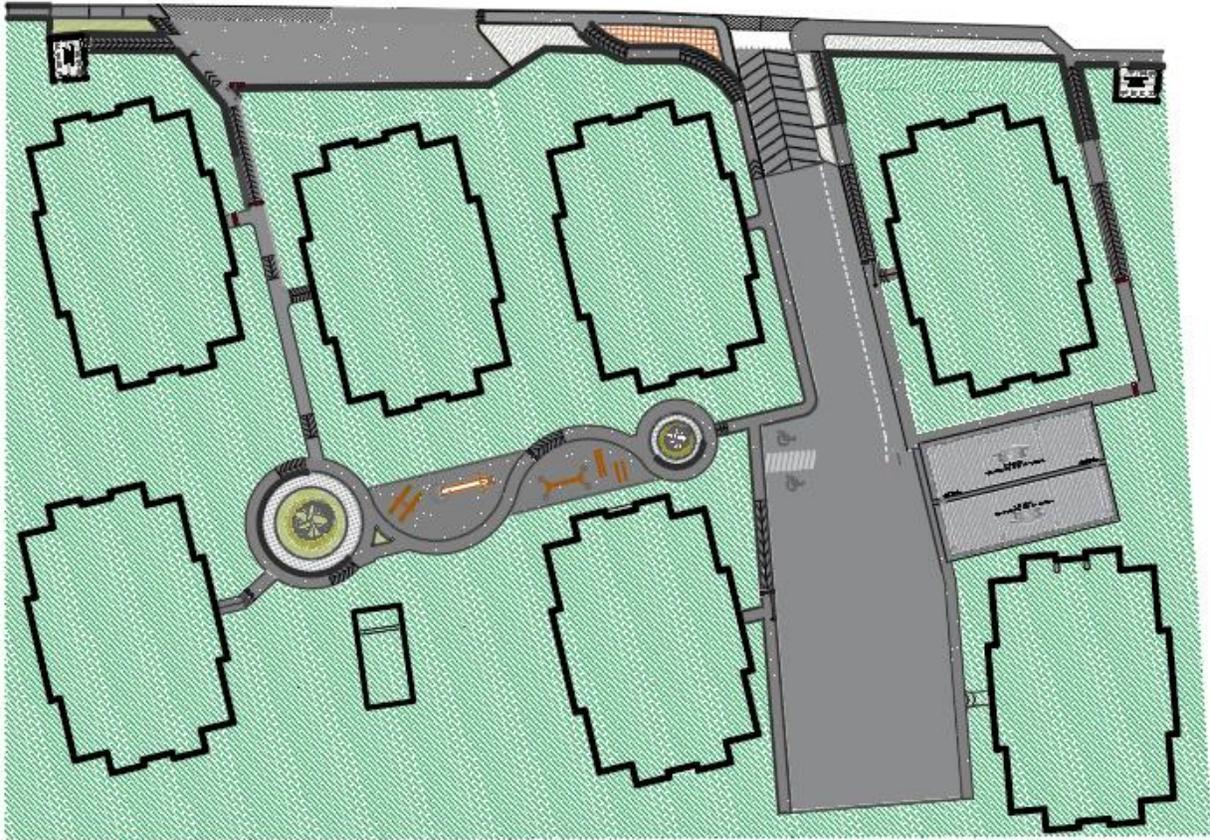
#### **Prediseño**

Para realizar el prediseño del tanque de acopio de aguas lluvias, se proyectó por medio de la metodología racional el cálculo del caudal total que podría almacenarse en dado caso que se genere un drenaje de la totalidad de la lluvia que cae en el área de cada urbanización.

Se implementó la metodología atendiendo las diferentes coberturas que se tienen en la urbanización (Zona verde y calle asfaltada en la zona del parqueadero), tal y cómo se

puede observar en la Figura 49, en donde la zona verde se considera como cobertura vegetal (pastos) y la zona gris como cobertura de pavimento.

*Figura 49 – Coberturas de la totalidad de la urbanización*



Conforme a lo anterior, se calculó por medio del método racional el caudal que drenaría al tanque de acopio de agua lluvia en las dos coberturas mostradas. Esto se observa en las Tabla 6 y Tabla 7.

*Tabla 6 – Cálculo de caudal captado en zonas verdes*

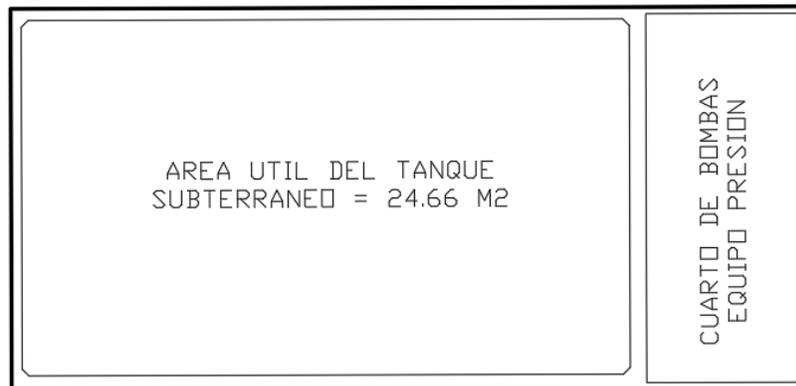
<b>Área total para drenar</b>	4946.98 m <sup>2</sup>
<b>Intensidad de lluvia</b>	0.000028 m/s
<b>Coefficiente de escorrentía</b>	0.34 – Zona con pastos (Hidrología en la ingeniería, Germán Monsalve)
<b>Caudal (m<sup>3</sup> / seg)</b>	0.047095

*Tabla 7 – Cálculo de caudal captado en zonas pavimentadas*

<b>Área total para drenar</b>	2520.65 m <sup>2</sup>
<b>Intensidad de lluvia</b>	0.000028 m/s
<b>Coefficiente de escorrentía</b>	0.95 – Zona asfaltada (Hidrología en la ingeniería, Germán Monsalve)
<b>Caudal (m<sup>3</sup> / seg)</b>	0.067049

Teniendo en cuenta lo anterior, el caudal total que captaría el tanque de almacenamiento de aguas lluvias es de 0.114145 m<sup>3</sup>/seg. Se destaca que, de la totalidad del agua acopiada, el 30% será reutilizada para usos generales dentro de la urbanización y el excedente se transportará hasta el colector que se encuentra en toda la mitad de la ciudadela. En la Figura 50 se expone el área disponible según la implantación de la urbanización y en la Tabla 8, el respectivo predimensionamiento del tanque.

*Figura 50 – Área útil para el prediseño del tanque de almacenamiento de agua lluvia*



*Tabla 8 – Predimensionamiento del tanque de agua lluvia*

<b>Caudal total</b>	0.114145 m <sup>3</sup> /s
<b>Porcentaje a almacenar y reutilizar</b>	30%
<b>Caudal para almacenar</b>	0.034243 m <sup>3</sup> /s
<b>Tiempo a almacenar</b>	15 min (900 s)
<b>Volumen a almacenar</b>	30.819 m <sup>3</sup>
<b>Área útil</b>	24.66 m <sup>2</sup>
<b>Borde libre</b>	0.25 m (RAS 2000)
<b>Lámina de agua</b>	1.25 m
<b>Altura total del tanque</b>	1.50 m

### **Modelación en el sistema computacional SWMM**

Para determinar el caudal que le llega al tanque, se procedió a realizar la modelación de todo el sistema, incluyendo la implementación de los SUDS (anteriormente descritos), en los diferentes frentes del sistema de drenaje pluvial de la urbanización. La distribución de la red general pluvial se puede observar en la Figura 51 y Figura 52.

Figura 51 – Distribución general de la red de drenaje pluvial



Figura 52 – Distribución general de la red de drenaje pluvial – SWMM – Con base a Figura 51



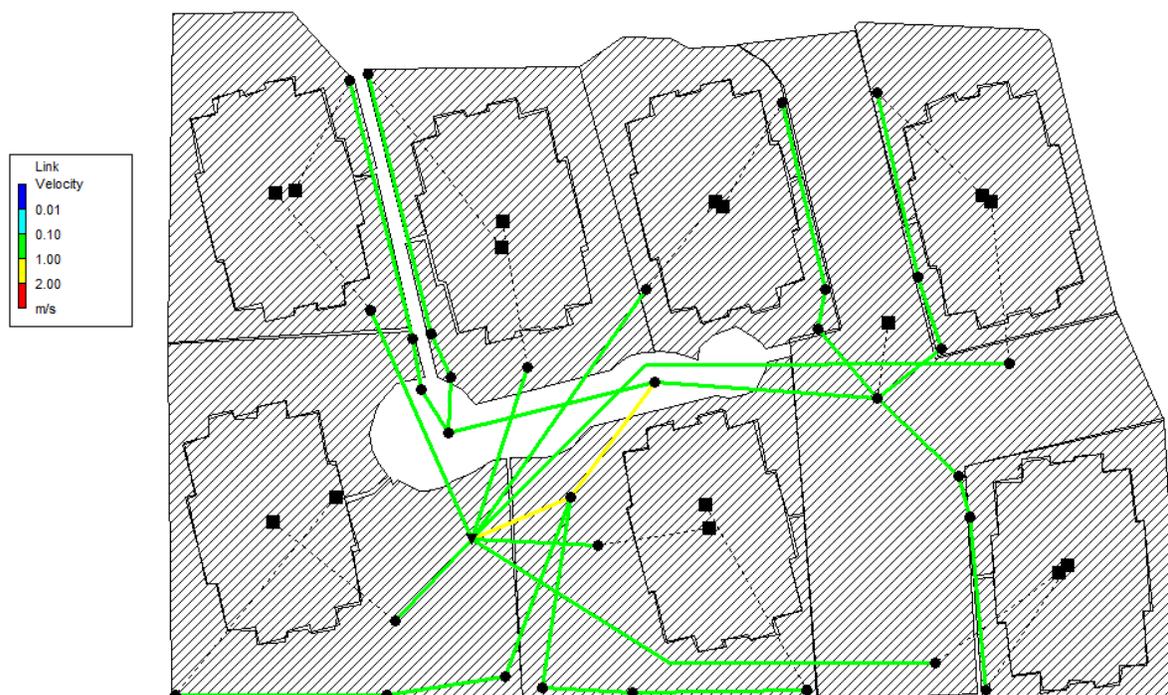
Figura 53 – Distribución general de la red de drenaje pluvial – Diámetros definitivos



Figura 54 - Caudales en la entrada del tanque

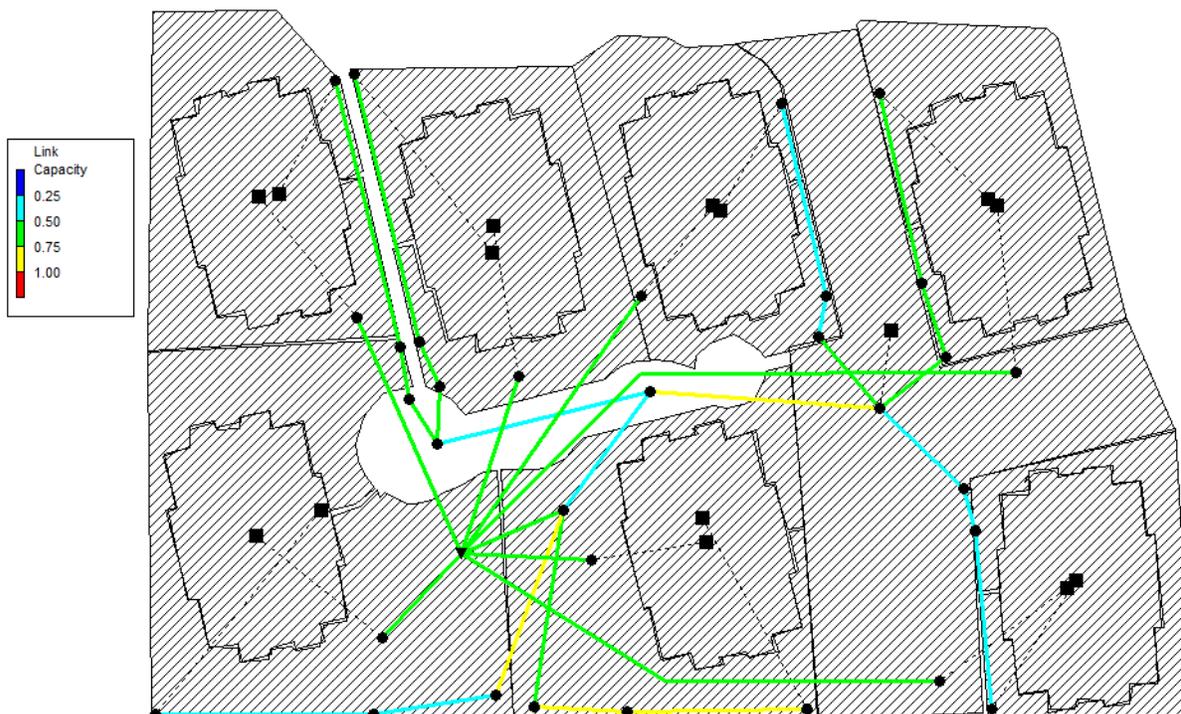
Horas	Caudal (LPS)
0:15:00	0.42
0:30:00	10.07
0:45:00	42.21
1:00:00	38.89
1:15:00	23.36
1:30:00	9.35
1:45:00	3.15

Figura 55 - Velocidades en los tramos – distribución general pluvial de Localización (2)



Se procedió a verificar que las velocidades que se desarrollan en todos los tramos de tuberías en la hora pico (00:45) como se muestra en la Figura 55, cumplen según el RAS 2000 Título D.4.3.6.1 y D.4.3.6.2 que tiene como rango permitido los valores de 0.75 m/s a 10.0 m/s (Con la premisa de que se tiene como material de conducción tuberías en PVC).

Figura 56 - Capacidad hidráulica en porcentaje de tuberías Localización (2)



Como se muestra en la Figura 56 se verifica que ninguna tubería tenga un comportamiento hidráulico a flujo lleno en el desarrollo total de la tormenta.

### Resultados y comentarios

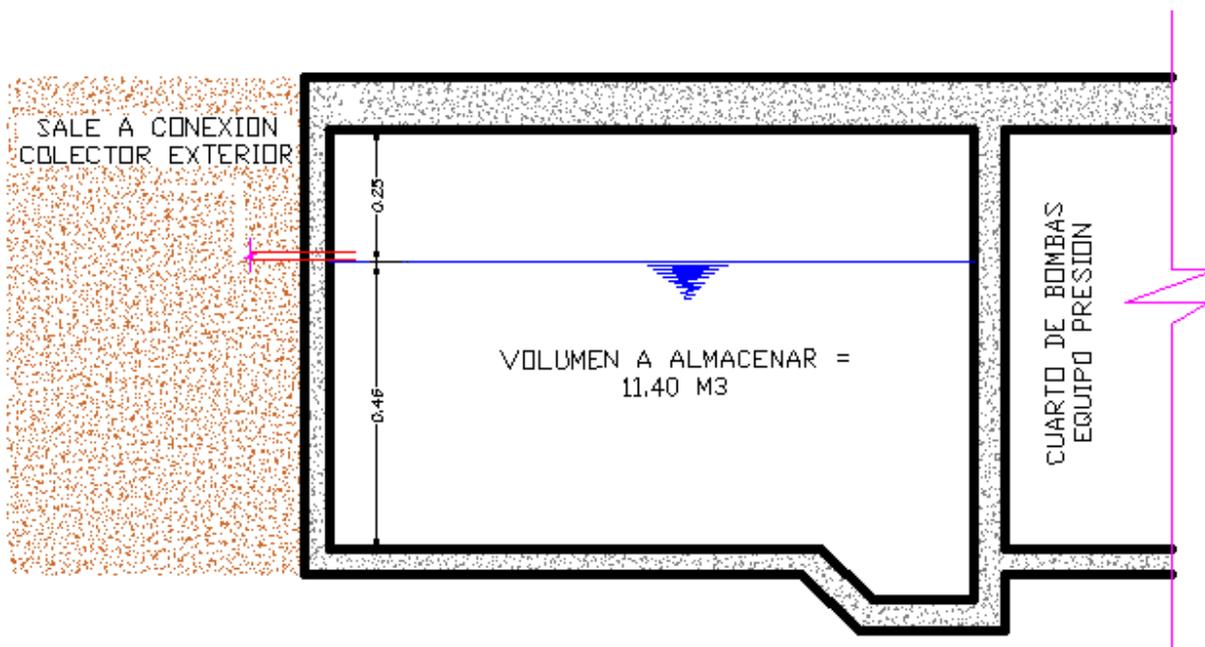
Conforme a los resultados obtenidos (ver en la Figura 54) tomando el caudal pico en la periodicidad de 00:45 minutos de la tormenta, se tiene un valor de 42.21 Lps, lo que corresponde a  $0.04221 \text{ m}^3/\text{s}$ . Lo anterior concluye que la implementación de los SUDS puede reducir considerablemente el caudal pico de una tormenta dada, lo cual se puede reflejar en el costo del proyecto.

Tabla 9 – Dimensionamiento final del tanque de agua lluvia – Ubicación No.2

<b>Caudal total</b>	0.04221 m <sup>3</sup> /s
<b>Porcentaje a almacenar y reutilizar</b>	30%
<b>Caudal para almacenar</b>	0.012663 m <sup>3</sup> /s
<b>Tiempo a almacenar</b>	15 min (900 s)
<b>Caudal a descargar a colector</b>	0.029547 m <sup>3</sup> /s
<b>Volumen a almacenar</b>	11.3967 m <sup>3</sup>
<b>Área útil</b>	24.66 m <sup>2</sup>
<b>Borde libre</b>	0.25 m (RAS 2000)
<b>Lámina de agua</b>	0.4621 m
<b>Altura total del tanque</b>	0.7121 m

En la Figura 57 se observa la distribución en corte del tanque enterrado propuesto. Adicionalmente, con respecto al prediseño sin contemplar integrar los SUDS, se puede observar que el caudal pico se redujo en un 36.96% lo que genera una reducción considerable en infraestructura del sistema de drenaje pluvial.

Figura 57 – Distribución tanque de almacenamiento aguas lluvias



#### 5.2.1.6 Diseño de red de drenaje hasta conexión a colector exterior a la urbanización (Red general de la ciudadela)

Una red de drenaje pluvial es un sistema de tuberías, drenajes e instalaciones complementarias que permite el rápido desalojo de las aguas de lluvia para evitar posibles molestias, e incluso daños materiales y humanos debido a su acumulación o al escurrimiento superficial generado por la lluvia. Su importancia se manifiesta especialmente en zonas con altas precipitaciones y superficies poco permeables.

Es importante destacar que la metodología empleada para el diseño de los nuevos sistemas de alcantarillado ha cambiado. Anteriormente, se recomendaban los sistemas de alcantarillado combinado, es decir, aquellos que desalojan aguas residuales y pluviales. Sin embargo, la tendencia actual es construir sistemas de alcantarillado separados. La separación de los sistemas obedece a la urgente necesidad de cuidar el ambiente, teniendo en cuenta que, aunque un sistema de alcantarillado combinado es más económico de construir, operar y mantener, resulta de mayor importancia dar tratamiento a las aguas residuales e industriales a fin de evitar la contaminación de ríos, lagos y mares.

El uso de sistemas de alcantarillado separados tiene ventajas tales como el tratamiento de menores volúmenes de aguas residuales, así como el posible reúso o aprovechamiento de las aguas pluviales. De esta forma, se invierte en la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales de menor tamaño, pues los volúmenes de las aguas pluviales son muy superiores a los correspondientes de las aguas residuales domésticas e industriales. Cabe destacar que un diseño eficiente y económico de una red de alcantarillado pluvial solo se logra mediante un análisis comparativo de una serie de opciones, por lo que el proyectista debe apoyarse en su juicio y experiencia, así como en las condiciones locales y de operación para determinar la opción más adecuada. (Agua, 2007)

#### **Diseño implantado definitivo**

En la Tabla 9 se tiene un caudal a descargar al colector exterior de 0.029547 m<sup>3</sup>/s. En el siguiente gráfico se expone la forma en que se determinó el diseño del tramo que corresponde desde la salida del tanque de almacenamiento al colector exterior. En la Figura 58 se presenta la forma en que se realizó la conexión interna de los colectores hasta llegar al exterior de cada urbanización y en la Tabla 10, se expone el cálculo de estos mismos, teniendo en cuenta la implementación de los SUDS y sin implementarlas.

Figura 58 – Colectores internos a conexión externa



Tabla 10 – Dimensionamiento Colectores internos – Ubicación No.2

<b>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO COLECTORES INTERNOS - CON SUDS</b>																	
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

TRAMO		CAUDAL (Lts/seg)	COEFICIENTE MANNING	DIAMETRO (pulg)	DIAMETRO (m)	PENDIENTE (%)	Q. TUBO LLENO (lts/seg)	V. TUBO LLENO (m/seg)	Q/qo	$\tau$ Kg/m <sup>2</sup>	LONGITUD (m)	COTAS RASANTES		COTAS CLAVES		COLUMNAS DE RECUBRIMIENTO	
DE	A											INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
A	B	29,55	0,009	10	0,254	0,50%	63,34	1,25	0,47	0,32	39,00	0,00	0,00	-0,60	-0,81	-0,60	-0,81
B	C	29,55	0,009	10	0,254	0,50%	63,34	1,25	0,47	0,32	32,69	0,00	0,00	-0,81	-0,97	-0,81	-0,97

<b>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO COLECTORES INTERNOS - SIN SUDS</b>																	
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

TRAMO		CAUDAL (Lts/seg)	COEFICIENTE MANNING	DIAMETRO (pulg)	DIAMETRO (m)	PENDIENTE (%)	Q. TUBO LLENO (lts/seg)	V. TUBO LLENO (m/seg)	Q/qo	$\tau$ Kg/m <sup>2</sup>	LONGITUD (m)	COTAS RASANTES		COTAS CLAVES		COLUMNAS DE RECUBRIMIENTO	
DE	A											INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
A	B	42.21	0.009	12	0.3048	0.50%	102.88	1.41	0.41	0.38	39.00	0.00	0.00	-0.60	-0.81	-0.60	-0.81
B	C	42.21	0.009	12	0.3048	0.50%	102.88	1.41	0.41	0.38	32.69	0.00	0.00	-0.81	-0.97	-0.81	-0.97

## Resultados y comentarios

Del análisis anterior, se observa que la implementación de los SUDS en una urbanización ayudará a reducir el costo de la instalación de drenaje, ya que se reducen los diámetros considerablemente.

Para realizar un análisis según el RAS 2000 se cumplen los siguientes ítems:

- Título D.4.3.4 el colector tiene como diámetro mínimo 215 mm (8").
- Título D.4.3.6.1 y D.4.3.6.2 el colector tiene como rango permitido los valores de 0.75 m/s a 10.0 m/s (Con la premisa de que se tiene como material de conducción tuberías en PVC).
- Título D.4.3.7.2 que tiene como parámetro una pendiente máxima del 10% y la pendiente mínima se debe garantizar con el ítem D.4.3.6.1 para garantizar la auto limpieza de la tubería

Todos los anteriores criterios, son reflejados con las normas del Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB ESP, por lo que aplica los criterios normativos de la ciudad de Bogotá.

### 5.2.1.7 Diseño de colector exterior (Colector que une todas las descargas)

Para realizar una cuantificación de la dimensión de los colectores exteriores se hace el análisis de una posible tubería que descargue las diez (10) urbanizaciones, lo que corresponde a la totalidad de la ciudadela.

Tabla 11 – Dimensionamiento Colectores Externo (Conexión de descargas)

<b>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO COLECTOR EXTERNO - CON SUDS</b>										
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

TRAMO		CAUDAL	COEFICIENTE	DIAMETRO	DIAMETRO	PENDIENTE	Q. TUBO LLENO	V. TUBO LLENO	Q/qo	$\tau$
DE	A	(Lts/seg)	MANNING	(pulg)	(m)	(%)	(lts/seg)	(m/seg)		Kg/m <sup>2</sup>
INICIO	FIN	295,47	0,009	20	0,508	0,50%	403,34	1,99	0,73	0,64

<b>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO COLECTOR EXTERNO - SIN SUDS</b>										
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

TRAMO		CAUDAL	COEFICIENTE	DIAMETRO	DIAMETRO	PENDIENTE	Q. TUBO LLENO	V. TUBO LLENO	Q/qo	$\tau$
DE	A	(Lts/seg)	MANNING	(pulg)	(m)	(%)	(lts/seg)	(m/seg)		Kg/m <sup>2</sup>
Inicio	Fin	799.00	0.009	27	0.6858	0.50%	893.92	2.42	0.89	0.86

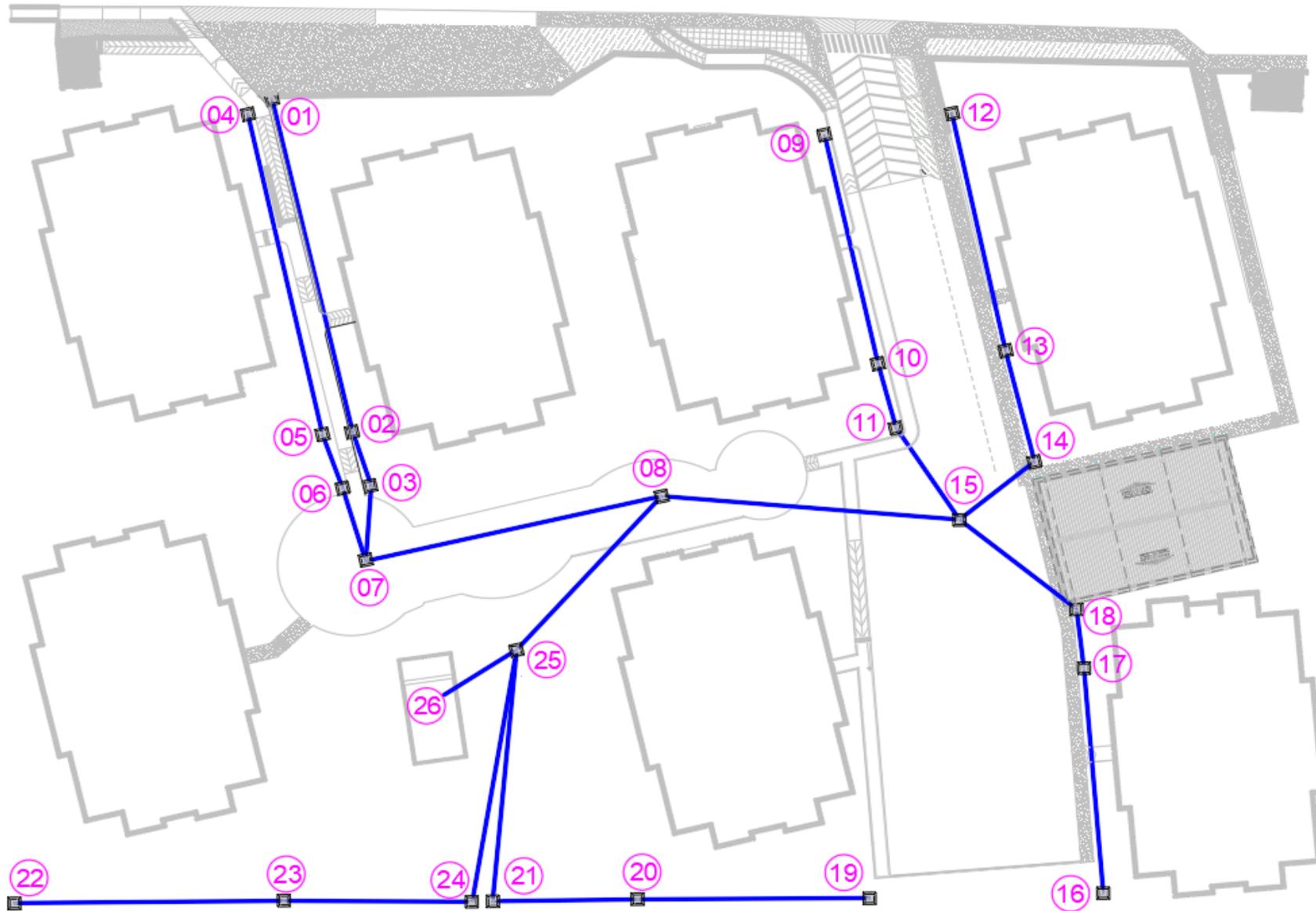
## Resultados y comentarios

Una vez ya se tienen todos los diseños finales de las estructuras a implantar, se procede a realizar el análisis de los costos del ahorro del agua contra los costos de la implementación de los SUDS mencionados anteriormente.

### 5.2.1.8 Simulación de escenarios Ubicación No.1 – Ubicación No.3

Con la metodología anterior, se presentan los resultados dados en cada uno de los escenarios planteados. Cabe resaltar que la tormenta de diseño cambia con base a las IDF según la ubicación de cada predio. A continuación, se presenta la distribución y la numeración tipo para la tabla de resultados del sistema de drenaje interno de cada una de las ubicaciones (Ver Figura 59). Adicionalmente, la numeración entre cajas a la salida del tanque de almacenamiento de agua lluvia, se puede observar en la Figura 58.

Figura 59 – Colectores internos – Sistema de drenaje pluvial interno



### Ubicación No.1 – Usaquén

Tormenta de diseño:

*Tabla 12 – Tormenta de diseño - Ubicación No.1 – Usaquén*

<b>Horas</b>	<b>Caudal (LPS)</b>
0:15:00	1.27
0:30:00	13.43
0:45:00	46.97
1:00:00	34.49
1:15:00	39.94
1:30:00	12.10
1:45:00	2.27

*Tabla 13 – Dimensionamiento final del tanque de agua lluvia – Ubicación No.1*

<b>Caudal total</b>	0.04697 m <sup>3</sup> /s
<b>Porcentaje a almacenar y reutilizar</b>	30.00%
<b>Caudal para almacenar</b>	0.01400 m <sup>3</sup> /s
<b>Tiempo a almacenar</b>	15 min (900 s)
<b>Caudal a descargar a colector</b>	0.032879 m <sup>3</sup> /s
<b>Volumen a almacenar</b>	12.1619 m <sup>3</sup>
<b>Área útil</b>	24.66 m <sup>2</sup>
<b>Borde libre</b>	0.25 m (RAS 2000)
<b>Lámina de agua</b>	0.5142 m
<b>Altura total del tanque</b>	0.7642 m

Tabla 14 – Resultados de colectores internos– Ubicación No.1

CONSOLIDADO DE RESPUESTA - UBICACIÓN No.1											
COLECTORES INTERNOS		CAUDAL (LPS)	Coficiente Manning	Diámetro (in)	Pendiente [%]	Velocidad	Longitud [m]	Cota Rasante Inicial [m]	Cota Rasante Final [m]	Cota Clave Inicial [m]	Cota Clave Final [m]
1	2	3.7	0.01	4	0.5	0.46	27.82	0.00	0.00	-0.40	-0.54
2	3	3.68	0.01	4	0.5	0.45	4.42	0.00	0.00	-0.54	-0.56
3	7	3.64	0.01	4	0.5	0.45	6.16	0.00	0.00	-0.56	-0.58
4	5	3.37	0.01	4	0.5	0.42	26.84	0.00	0.00	-0.40	-0.53
5	6	3.34	0.01	4	0.5	0.41	4.59	0.00	0.00	-0.53	-0.56
6	7	3.31	0.01	4	0.5	0.41	6.22	0.00	0.00	-0.56	-0.58
7	8	6.76	0.01	6	0.5	0.37	23.73	0.00	0.00	-0.58	-0.71
12	13	2.94	0.01	4	0.5	0.36	19.83	0.00	0.00	-0.40	-0.50
13	14	2.9	0.01	4	0.5	0.36	9.32	0.00	0.00	-0.50	-0.55
14	15	2.86	0.01	4	0.5	0.35	7.56	0.00	0.00	-0.55	-0.57
9	10	2.63	0.01	4	0.5	0.32	19.05	0.00	0.00	-0.40	-0.50
10	11	2.62	0.01	4	0.5	0.32	5.43	0.00	0.00	-0.50	-0.55
11	15	2.57	0.01	4	0.5	0.32	9.00	0.00	0.00	-0.55	-0.57
16	17	2.02	0.01	4	0.5	0.25	18.38	0.00	0.00	-0.40	-0.49
17	18	2.01	0.01	4	0.5	0.25	4.49	0.00	0.00	-0.49	-0.52
18	15	2.97	0.01	4	0.5	0.37	11.72	0.00	0.00	-0.52	-0.57
15	8	14.94	0.01	6	0.5	1.18	23.42	0.00	0.00	-0.57	-0.71
8	25	21.6	0.01	10	0.5	0.43	16.92	0.00	0.00	-0.71	-0.79
25	26	33.6	0.01	10	0.5	0.66	6.77	0.00	0.00	-0.79	-0.83
22	23	7.79	0.01	6	0.5	0.43	21.09	0.00	0.00	-0.40	-0.51
23	24	7.65	0.01	6	0.5	0.42	14.80	0.00	0.00	-0.51	-0.58
24	25	7.4	0.01	6	0.5	0.41	20.84	0.00	0.00	-0.58	-0.79
19	20	5.12	0.01	4	0.5	0.63	18.22	0.00	0.00	-0.40	-0.49
20	21	4.79	0.01	4	0.5	0.59	11.32	0.00	0.00	-0.49	-0.55
21	25	4.79	0.01	4	0.5	0.59	20.59	0.00	0.00	-0.55	-0.79

*Tabla 15 – Resultados de colectores Internos– Ubicación No.1*

<b>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO COLECTORES INTERNOS - CON SUDS</b>																	
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

TRAMO		CAUDAL (Lts/seg)	COEFICIENTE MANNING	DIAMETRO (pulg)	DIAMETRO (m)	PENDIENTE (%)	Q. TUBO LLENO (lts/seg)	V. TUBO LLENO (m/seg)	Q/qo	$\tau$ Kg/m2	LONGITUD (m)	COTAS RASANTES		COTAS CLAVES		COLUMNAS DE RECUBRIMIENTO	
DE	A											INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
A	B	32.88	0.009	8	0.2032	0.50%	35.02	1.08	0.94	0.25	39.00	0.00	0.00	-0.60	-0.81	-0.60	-0.81
B	C	32.88	0.009	8	0.2032	0.50%	35.02	1.08	0.94	0.25	32.69	0.00	0.00	-0.81	-0.97	-0.81	-0.97

<b>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO COLECTORES INTERNOS - SIN SUDS</b>																	
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

TRAMO		CAUDAL (Lts/seg)	COEFICIENTE MANNING	DIAMETRO (pulg)	DIAMETRO (m)	PENDIENTE (%)	Q. TUBO LLENO (lts/seg)	V. TUBO LLENO (m/seg)	Q/qo	$\tau$ Kg/m2	LONGITUD (m)	COTAS RASANTES		COTAS CLAVES		COLUMNAS DE RECUBRIMIENTO	
DE	A											INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
A	B	46.79	0.009	12	0.3048	0.50%	102.88	1.41	0.45	0.38	39.00	0.00	0.00	-0.60	-0.81	-0.60	-0.81
B	C	46.79	0.009	12	0.3048	0.50%	102.88	1.41	0.45	0.38	32.69	0.00	0.00	-0.81	-0.97	-0.81	-0.97

*Tabla 16 – Resultados Colector total Ciudadela – Ubicación No.1*

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO  
COLECTOR EXTERNO - CON SUDS**

TRAMO		CAUDAL (Lts/seg)	COEFICIENTE MANNING	DIAMETRO (pulg)	DIAMETRO (m)	PENDIENTE (%)	Q. TUBO LLENO (lts/seg)	V. TUBO LLENO (m/seg)	Q/qo	$\tau$
DE	A									Kg/m2
INICIO	FIN	328.79	0.009	20	0.508	0.50%	403.34	1.99	0.82	0.64

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO  
COLECTOR EXTERNO - SIN SUDS**

TRAMO		CAUDAL (Lts/seg)	COEFICIENTE MANNING	DIAMETRO (pulg)	DIAMETRO (m)	PENDIENTE (%)	Q. TUBO LLENO (lts/seg)	V. TUBO LLENO (m/seg)	Q/qo	$\tau$
DE	A									Kg/m2
Inicio	Fin	467.90	0.009	24	0.6096	0.50%	653.77	2.24	0.72	0.76

### Ubicación No.3 – Bosa

Tormenta de diseño:

*Tabla 17 – Tormenta de diseño - Ubicación No.3 – Bosa*

<b>Horas</b>	<b>Caudal (LPS)</b>
0:15:00	0.33
0:30:00	7.37
0:45:00	26.15
1:00:00	33.75
1:15:00	16.35
1:30:00	8.01
1:45:00	1.79

*Tabla 18 – Dimensionamiento final del tanque de agua lluvia – Ubicación No.3*

<b>Caudal total</b>	0.03375 m <sup>3</sup> /s
<b>Porcentaje a almacenar y reutilizar</b>	30.00%
<b>Caudal para almacenar</b>	0.010125 m <sup>3</sup> /s
<b>Tiempo a almacenar</b>	15 min (900 s)
<b>Caudal a descargar a colector</b>	0.023625 m <sup>3</sup> /s
<b>Volumen a almacenar</b>	9.1125 m <sup>3</sup>
<b>Área útil</b>	24.66 m <sup>2</sup>
<b>Borde libre</b>	0.25 m (RAS 2000)
<b>Lámina de agua</b>	0.3695 m
<b>Altura total del tanque</b>	0.6195 m

Tabla 19 – Resultados de colectores internos– Ubicación No.3

CONSOLIDADO DE RESPUESTA - UBICACIÓN No.3											
COLECTORES INTERNOS		CAUDAL [LPS]	Coefficiente Manning	Diámetro [in]	Pendiente [%]	Velocidad [m/s]	Longitud [m]	Cota Rasante Inicial [m]	Cota Rasante Final [m]	Cota Clave Inicial [m]	Cota Clave Final [m]
1	2	2.11	0.01	4	0.5	0.26	27.82	0.00	0.00	-0.40	-0.54
2	3	2.1	0.01	4	0.5	0.26	4.42	0.00	0.00	-0.54	-0.56
3	7	2.08	0.01	4	0.5	0.26	6.16	0.00	0.00	-0.56	-0.58
4	5	1.92	0.01	4	0.5	0.24	26.84	0.00	0.00	-0.40	-0.53
5	6	1.9	0.01	4	0.5	0.23	4.59	0.00	0.00	-0.53	-0.56
6	7	1.88	0.01	4	0.5	0.23	6.22	0.00	0.00	-0.56	-0.58
7	8	3.83	0.01	6	0.5	0.21	23.73	0.00	0.00	-0.58	-0.71
12	13	1.67	0.01	4	0.5	0.21	19.83	0.00	0.00	-0.40	-0.50
13	14	1.65	0.01	4	0.5	0.20	9.32	0.00	0.00	-0.50	-0.55
14	15	1.63	0.01	4	0.5	0.20	7.56	0.00	0.00	-0.55	-0.57
9	10	1.5	0.01	4	0.5	0.19	19.05	0.00	0.00	-0.40	-0.50
10	11	1.49	0.01	4	0.5	0.18	5.43	0.00	0.00	-0.50	-0.55
11	15	1.46	0.01	4	0.5	0.18	9.00	0.00	0.00	-0.55	-0.57
16	17	1.16	0.01	4	0.5	0.14	18.38	0.00	0.00	-0.40	-0.49
17	18	1.15	0.01	4	0.5	0.14	4.49	0.00	0.00	-0.49	-0.52
18	15	1.12	0.01	4	0.5	0.14	11.72	0.00	0.00	-0.52	-0.57
15	8	8.84	0.01	6	0.5	0.70	23.42	0.00	0.00	-0.57	-0.71
8	25	12.41	0.01	10	0.5	0.24	16.92	0.00	0.00	-0.71	-0.79
25	26	19.32	0.01	10	0.5	0.38	6.77	0.00	0.00	-0.79	-0.83
22	23	4.42	0.01	6	0.5	0.24	21.09	0.00	0.00	-0.40	-0.51
23	24	4.33	0.01	6	0.5	0.24	14.80	0.00	0.00	-0.51	-0.58
24	25	4.23	0.01	6	0.5	0.23	20.84	0.00	0.00	-0.58	-0.79
19	20	2.95	0.01	4	0.5	0.36	18.22	0.00	0.00	-0.40	-0.49
20	21	2.9	0.01	4	0.5	0.36	11.32	0.00	0.00	-0.49	-0.55
21	25	2.84	0.01	4	0.5	0.35	20.59	0.00	0.00	-0.55	-0.79

*Tabla 20 – Resultados de colectores Internos– Ubicación No.3*

<b>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO COLECTORES INTERNOS - CON SUDS</b>																	
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

TRAMO		CAUDAL (Lts/seg)	COEFICIENTE MANNING	DIAMETRO (pulg)	DIAMETRO (m)	PENDIENTE (%)	Q. TUBO LLENO (lts/seg)	V. TUBO LLENO (m/seg)	Q/qo	$\tau$ Kg/m <sup>2</sup>	LONGITUD (m)	COTAS RASANTES		COTAS CLAVES		COLUMNAS DE RECUBRIMIENTO	
DE	A											INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
A	B	23.62	0.009	8	0.2032	0.50%	35.02	1.08	0.67	0.25	39.00	0.00	0.00	-0.60	-0.81	-0.60	-0.81
B	C	23.62	0.009	8	0.2032	0.50%	35.02	1.08	0.67	0.25	32.69	0.00	0.00	-0.81	-0.97	-0.81	-0.97

<b>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO COLECTORES INTERNOS - SIN SUDS</b>																	
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

TRAMO		CAUDAL (Lts/seg)	COEFICIENTE MANNING	DIAMETRO (pulg)	DIAMETRO (m)	PENDIENTE (%)	Q. TUBO LLENO (lts/seg)	V. TUBO LLENO (m/seg)	Q/qo	$\tau$ Kg/m <sup>2</sup>	LONGITUD (m)	COTAS RASANTES		COTAS CLAVES		COLUMNAS DE RECUBRIMIENTO	
DE	A											INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
A	B	33.75	0.009	10	0.254	0.50%	63.34	1.25	0.53	0.32	39.00	0.00	0.00	-0.60	-0.81	-0.60	-0.81
B	C	33.75	0.009	10	0.254	0.50%	63.34	1.25	0.53	0.32	32.69	0.00	0.00	-0.81	-0.97	-0.81	-0.97

*Tabla 21 – Resultados Colector total Ciudadela – Ubicación No.3*

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO  
COLECTOR EXTERNO - CON SUDS**

TRAMO		CAUDAL	COEFICIENTE	DIAMETRO	DIAMETRO	PENDIENTE	Q. TUBO LLENO	V. TUBO LLENO	Q/qo	$\tau$
DE	A	(Lts/seg)	MANNING	(pulg)	(m)	(%)	(lts/seg)	(m/seg)		Kg/m2
INICIO	FIN	236.20	0.009	18	0.4572	0.50%	303.72	1.85	0.78	0.57

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO  
COLECTOR EXTERNO - SIN SUDS**

TRAMO		CAUDAL	COEFICIENTE	DIAMETRO	DIAMETRO	PENDIENTE	Q. TUBO LLENO	V. TUBO LLENO	Q/qo	$\tau$
DE	A	(Lts/seg)	MANNING	(pulg)	(m)	(%)	(lts/seg)	(m/seg)		Kg/m2
Inicio	Fin	337.50	0.009	20	0.508	0.50%	403.34	1.99	0.84	0.64

## 6. COMPARACIÓN DE BENEFICIO VS COSTO

Una vez obtenidos todos los resultados de la aplicación de los SUDS a las urbanizaciones, se determinó la relación costo-beneficio del ahorro de agua que se produce estos sistemas de drenaje y el análisis de las posibles alternativas para lograr la viabilidad de los proyectos independiente a su estrato social.

### 6.1 Costo de agua en cada uno de los estratos propuestos

En este apartado, se presenta el análisis realizado a partir del volumen que se podrá almacenar y reutilizar para diferentes usos en las urbanizaciones, en donde la ubicación de cada urbanización y el estrato de éste será el que determine el costo del metro cúbico de agua ahorrado. A continuación, en la Tabla 22 se presenta el valor del costo por m<sup>3</sup> de agua según el estrato conforme a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP, el cual está directamente asociado con las ubicaciones planteadas.<sup>2</sup>

*Tabla 22 – Costos por m<sup>3</sup> de agua según el estrato*

<b>Estrato</b>	<b>Costo [\$/m3] - 2019</b>
1	779.20
4	2218.53
6	4306.57

Fuente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP, 2019

### 6.2 Proyección de ahorro del agua utilizada para abastecer los servicios generales

Con base al análisis del agua a almacenar con la implementación de los SUDS, se proyectó el posible ahorro según la ubicación y estrato en una periodicidad mensual y anual, lo cual es insumo para las conclusiones de este trabajo. En la Tabla 23 se muestra lo anteriormente mencionado.

---

<sup>2</sup> **Nota:** Cabe resaltar que el precio mencionado en la Tabla 22, es el correspondiente al valor por m3 del consumo básico, lo que hace referencia al precio por consumo normal tarifario.

Tabla 23 – Proyección de ahorro del agua según lo almacenado por medio de SUDS

Estrato	Costo [\$/m3] - 2019	Volumen almacenado [m3]	Costo de agua ahorrada [mensual-\$]	Costo de agua ahorrada [Anual-\$]
1	779.20	12,2	9.476,55	113.719
4	2218.53	11,4	25.283,90	303.407
6	4306.57	9,1	39.243,60	470.923

Fuente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP, 2019

### 6.3 Proyección de ahorro en el costo del sistema de drenaje pluvial interno en la urbanización con la implementación de los SUDS

Con el objeto de realizar un análisis del costo de la implementación de los SUDS propuestos anteriormente (Ver 3.2 Sistemas Urbanos de drenaje sostenible analizados), se realizó el estudio de los precios unitarios (APU's) para cada uno de estos y el costo proyectado desde la salida del tanque de acopio para reutilización, hasta la conexión del colector externo. Cabe resaltar que los precios presentados a continuación, no tienen valor de transporte ni IVA<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Se denomina IVA al impuesto sobre el valor añadido de un producto.

### 6.3.1 Análisis de costo Cubiertas verdes

Tabla 24 - APU Cubiertas Verdes

Descompuesto	Ud.	Descomposición	Rend.	Precio unitario	Precio partida
mt14lbk010	m <sup>2</sup>	Membrana anti-raíces Urbanscape "KANAU INSULATION", de polietileno de baja densidad, de color negro, para cubiertas ajardinadas extensivas	1.1	\$ 9,806	\$ 10,786
mt14lbk020a	m <sup>2</sup>	Lámina drenante y retenedora de agua, Urbanscape C "KNAUF INSULATION", con depósito de agua, formada por membrana de polietileno reciclado reforzado y perforaciones en la parte superior, para cubiertas ajardinadas extensivas	1.1	\$ 43,350	\$ 47,685
mt14lbk030	m <sup>2</sup>	Sustrato Urbanscape Green Roll (HTC GR) de lana mineral, de 40 mm de espesor, para cubiertas ajardinadas extensivas	1.1	\$ 29,271	\$ 32,198
mt14lbk040	m <sup>2</sup>	Tepe Urbanscape Sedum-mix, para cubiertas ajardinadas extensivas	1.1	\$ 101,452	\$ 111,598
mo039	h	Oficial 1ª jardinero	0.287	\$ 125,866	\$ 36,124
mo113	h	Peón jardinero	0.287	\$ 7,351	\$ 2,110
	%	Medios auxiliares	2	\$ 2,405	\$ 4,810
	%	Costos indirectos	3	\$ 2,453	\$ 7,360
Coste de mantenimiento decenal: \$ 68.706 en los primeros 10 años				Total	\$ 252,670

Fuente: Generador de precios Colombia, 2019

Con el precio por m<sup>2</sup> de cubiertas verdes se calcula el valor total para cada una de las urbanizaciones, el índice de ocupación de las cubiertas verdes fue de un 26.4%, teniendo un total como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 25 - Costo Total Cubiertas Verdes

Localidad	Área de aplicación Cubiertas verdes m <sup>2</sup>	Precio de instalación por m <sup>2</sup>	Total
Usaquén (1)	559	\$ 252,670	\$ 141,242,530
Simón Bolívar (2)	559	\$ 252,670	\$ 141,242,530
Bosa (3)	559	\$ 252,670	\$ 141,242,530

### 6.3.2 Análisis de costo Cunetas Verdes

Tabla 26 - APU Cunetas Verdes

Descompuesto	Ud.	Descomposición	Rend.	Precio unitario	Precio partida
mt10hmf050qdf	m³	Concreto simple f'c=210 kg/cm² (21 MPa), clase de exposición F0 S0 P0 C0, tamaño máximo del agregado 19 mm, manejabilidad plástica, fabricado en planta, según NSR-10 y ACI 318.	0.180	\$ 274,771	\$ 49,459
mt08ema050b	m³	Madera para encofrar, de 26 mm de espesor.	0.001	\$ 722,030	\$ 722
mt08var050	kg	Alambre galvanizado para atar, de 1,30 mm de diámetro.	0.025	\$ 2,063	\$ 52
mt08var060	kg	Puntas de acero de 20x100 mm.	0.010	\$ 13,128	\$ 131
mt15bas030b	Ud.	Cartucho de masilla elastómera mono componente a base de poliuretano, de color gris, de 600 ml, tipo F-25 HM según ISO 11600, de alta adherencia y de endurecimiento rápido, con elevadas propiedades elásticas, resistencia a la intemperie, al envejecimiento y a los rayos UV, apta para estar en contacto con agua potable, dureza Shore A aproximada de 35 y alargamiento en rotura > 600%, según ISO 11600.	0.360	\$ 19,995	\$ 7,198
mq02rod010d	h	Bandeja vibrante de guiado manual, de 300 kg, anchura de trabajo 70 cm, reversible.	0.431	\$ 12,141	\$ 5,233
mq06cor020	h	Equipo para corte de juntas en soleras de concreto.	0.005	\$ 18,050	\$ 90
mo041	h	Oficial 1ª obra blanca de obra civil.	0.487	\$ 13,603	\$ 6,624
mo087	h	Ayudante de obra blanca de obra civil.	0.487	\$ 10,111	\$ 4,924
-	%	Herramienta menor	2.000	\$ 74,433	\$ 1,489
-	m2/ml	Geotextil NT 1600	4.000	\$ 4,258	\$ 170
-	ml	Tubería corrugada perforada	1.000	\$ 15,494	\$ 155
-	m3/ml	Grava de 1/2"	0.600	\$ 71,410	\$ 428
				Total	\$ 76,676

Fuente: Generador de Precios Colombia, 2019

Tabla 27 - Costo Total Cunetas Verdes

Ubicación	Longitud Cunetas (m)	Precio instalación / m	Total
Usaquén (1)	615	\$ 76,676	\$ 47,155,740
Simón Bolívar (2)	615	\$ 76,676	\$ 47,155,740
Bosa (3)	615	\$ 76,676	\$ 47,155,740

### 6.3.3 Análisis de Tanque de acopio aguas lluvias

Teniendo en cuenta que el tanque de almacenamiento de aguas lluvias es el objeto de la investigación ya que en él se va a almacenar el 30.00% del agua que transporta el sistema de drenaje pluvial, a continuación, se cuantificó el costo de este según la ubicación. Se aclara que no se determinó el precio del cuarto de bombas a presión ni los equipos que lo componen.

*Tabla 28 - APU Tanques de almacenamiento de agua*

Ubicación	Volumen de agua a almacenar (m3)	Volumen de Concreto Impermeabilizado 28 Mpa (m3)	Costo de Concreto (\$/m3)	Volumen de refuerzo / volumen de concreto (m3)	Costo de Refuerzo (\$/m3)	Número de accesos estandarizados (0.60x0.60)	Costo de accesos estandarizados (0.60x0.60) (\$)	Mano de obra (Hr) (Por turnos de 8 horas) - Brigada (4 Personaas)	Costo Mano de obra (brigada/hora)	Costo total Tanque
Usaquen (1)	11.39	6.63	\$ 583,212	1.99	\$ 832,524	2.00	\$ 164,387	48.00	\$ 187,658	\$ 14,857,277.86
Puente Aranda (2)	9.11	6.41	\$ 583,212	1.92	\$ 832,524	2.00	\$ 167,387	48.00	\$ 187,658	\$ 14,680,024.63
Bosa (3)	12.16	6.73	\$ 583,212	2.02	\$ 832,524	2.00	\$ 167,987	48.00	\$ 187,658	\$ 14,947,774.78

Fuente: Generador de Precios Colombia, 2019

### 6.3.4 Análisis de costo conexión desde tanque de acopio a colector exterior

Para los colectores que salen del tanque de captación se obtuvieron varios diámetros en cada modelación, en virtud de ello, se hace necesario hacer APU's para diferentes tuberías, como se muestra a continuación:

#### 6.3.4.1 Con implementación de SUDS

A continuación, se expone el resultado de la cuantificación del costo total de los colectores desde el tanque de acopio a colector exterior teniendo en cuenta la reducción de caudal por los SUDS.

*Tabla 29 - APU Colector de 8 Pulgadas*

<b>Colector de 8 pulgadas</b>					
Descompuesto	Ud.	Descomposición	Rend.	Precio unitario	Precio partida
mt11tpb030d	m	Tubo de PVC liso, para saneamiento enterrado sin presión, serie SN-4, rigidez anular nominal 4 kN/m <sup>2</sup> , de 250 mm de diámetro exterior y 6,2 mm de espesor.	1.05	\$ 23,079	\$ 24,233
mt11var009	l	Líquido limpiador para pegado mediante adhesivo de tubos y accesorios de PVC.	0.012	\$ 36,114	\$ 433
mt11var010	l	Adhesivo para tubos y accesorios de PVC.	0.006	\$ 50,041	\$ 300
mt01ara010	m <sup>3</sup>	Arena de 0 a 5 mm de diámetro.	0.329	\$ 25,971	\$ 8,545
mq01ret020b	h	Retrocargador sobre neumáticos, de 70 kW.	0.039	\$ 69,141	\$ 2,697
mq02rop020	h	Pisón vibrante de guiado manual, de 80 kg, con placa de 30x30 cm, tipo rana.	0.265	\$ 6,650	\$ 1,762
mo041	h	Oficial 1 <sup>a</sup> obra blanca de obra civil.	0.208	\$ 13,603	\$ 2,829
mo087	h	Ayudante de obra blanca de obra civil.	0.1	\$ 10,111	\$ 1,011
	%	Herramienta menor	2	\$ 418	\$ 836
				Total	\$ 42,647

Fuente: Generador de Precios Colombia

*Tabla 30 – Costo total de conexión Colector 8 Pulgadas – Con SUDS*

Ubicación	Longitud Tubería (m)	Precio instalación / m	Total
Usaquén (1)	71.7	\$ 42,647	\$ 3,057,789.9
Bosa (3)	71.7	\$ 42,647	\$ 3,057,789.9

Tabla 31- APU Colector 10 Pulgadas

<b>Colector de 10 pulgadas</b>					
Descompuesto	Ud.	Descomposición	Rend.	Precio unitario	Precio partida
mt11tpb030e	m	Tubo de PVC liso, para saneamiento enterrado sin presión, serie SN-4, rigidez anular nominal 4 kN/m <sup>2</sup> , de 250 mm de diámetro exterior y 6,2 mm de espesor.	1.05	\$ 36,500	\$ 38,325
mt11var009	l	Líquido limpiador para pegado mediante adhesivo de tubos y accesorios de PVC.	0.014	\$ 36,114	\$ 506
mt11var010	l	Adhesivo para tubos y accesorios de PVC.	0.007	\$ 50,041	\$ 350
mt01ara010	m <sup>3</sup>	Arena de 0 a 5 mm de diámetro.	0.373	\$ 25,971	\$ 9,687
mq01ret020b	h	Retrocargador sobre neumáticos, de 70 kW.	0.046	\$ 69,141	\$ 3,181
mq02rop020	h	Pisón vibrante de guiado manual, de 80 kg, con placa de 30x30 cm, tipo rana.	0.302	\$ 6,650	\$ 2,008
mo041	h	Oficial 1ª obra blanca de obra civil.	0.234	\$ 13,603	\$ 3,183
mo087	h	Ayudante de obra blanca de obra civil.	0.112	\$ 10,111	\$ 1,132
	%	Herramienta menor	2	\$ 584	\$ 1,167
				Total	\$ 59,540

Fuente: Generador de Precios Colombia

Tabla 32 – Costo total de conexión Colector 10 Pulgadas – Con SUDS

Ubicación	Longitud Tubería (m)	Precio instalación / m	Total
Simón Bolívar (2)	71.7	\$ 59,540	\$ 4,269,018

## 6.3.4.1 Sin implementación de SUDS

En la siguiente Tabla (33) se expone el resultado de la cuantificación del costo total de los colectores desde el tanque de acopio a colector exterior sin tener en cuenta la reducción de caudal por los SUDS.

**Tabla 33 - APU Colector 12 Pulgadas**

<b>Colector de 12 pulgadas</b>					
Descompuesto	Ud.	Descomposición	Rend.	Precio unitario	Precio partida
mt11tpb030f	m	Tubo de PVC liso, para saneamiento enterrado sin presión, serie SN-4, rigidez anular nominal 4 kN/m <sup>2</sup> , de 315 mm de diámetro exterior y 7,7 mm de espesor.	1.05	\$ 56,753	\$ 59,590
mt11var009	l	Líquido limpiador para pegado mediante adhesivo de tubos y accesorios de PVC.	0.016	\$ 36,114	\$ 578
mt11var010	l	Adhesivo para tubos y accesorios de PVC.	0.008	\$ 50,041	\$ 400
mt01ara010	m <sup>3</sup>	Arena de 0 a 5 mm de diámetro.	0.43	\$ 25,971	\$ 11,168
mq01ret020b	h	Retrocargador sobre neumáticos, de 70 kW.	0.055	\$ 69,141	\$ 3,803
mq02rop020	h	Pisón vibrante de guiado manual, de 80 kg, con placa de 30x30 cm, tipo rana.	0.35	\$ 6,650	\$ 2,328
mo041	h	Oficial 1ª obra blanca de obra civil.	0.268	\$ 13,603	\$ 3,645
mo087	h	Ayudante de obra blanca de obra civil.	0.128	\$ 10,111	\$ 1,294
	%	Herramienta menor	2	\$ 829	\$ 1,658
				Total	\$ 84,464

Fuente: Generador de Precios Colombia

**Tabla 34 – Costo total de conexión Colector 12 Pulgadas – Sin SUDS**

Ubicación	Longitud Tubería (m)	Precio instalación / m	Total
Usaquén (1)	71.7	\$ 84,464	\$ 6,056,068
Simón Bolívar (2)	71.7	\$ 84,464	\$ 6,056,068

**Tabla 35 – Costo total de conexión Colector 10 Pulgadas – Sin SUDS**

Ubicación	Longitud Tubería (m)	Precio instalación / m	Total
Bosa (3)	71.7	\$ 59,540	\$ 4,269,018

#### **6.4 Proyección de ahorro en el costo del sistema de drenaje general de la ciudadela (Colector principal), con la implementación de los SUDS**

Se realizó la cuantificación del costo que se incurriría a partir de la implementación de los SUDS y sin ellos, reflejado en el colector pluvial que conectará cada descarga de las urbanizaciones que hacen parte de la ciudadela (Ver Figura 15). Cabe resaltar que para los colectores principales se obtuvieron varios diámetros en cada modelación, por lo que se hace necesario hacer APU para diferentes tuberías, como se muestra a continuación.

##### **6.4.1 Análisis de costo colector principal de la Ciudadela – Sin SUDS**

En el presente literal, se realizó el análisis de costos correspondientes al colector pluvial que conecta cada urbanización sin la implementación de SUDS para cada una de las ubicaciones como se muestra a continuación.

A continuación, se presentan los costos de las instalaciones de los colectores internos para cada urbanización

## 6.4.1.1 Ubicación No.1 – Sin implementación de SUDS

Tabla 36 - APU Colector de 24 pulgadas – Sin SUDS – Ubicación No.1

Colector de 24 pulgadas					
Descompuesto	Ud.	Descomposición	Rend.	Precio unitario	Precio partida
mt11ade020m	m	Tubo para saneamiento de PVC de doble pared, la exterior corrugada y la interior lisa, color teja RAL 8023, diámetro nominal 630 mm, diámetro exterior 649,2 mm, diámetro interior 590 mm, rigidez anular nominal 8 kN/m <sup>2</sup> , coeficiente de fluencia inferior a 2, longitud nominal 6 m, unión por copa con junta elástica de EPDM.	1.050	\$ 258,694	\$ 271,628
mt11ade100a	kg	Lubricante para unión mediante junta elástica de tubos y accesorios.	0.016	\$ 22,885	\$ 366
mt01ara010	m <sup>3</sup>	Arena de 0 a 5 mm de diámetro.	0.770	\$ 25,971	\$ 19,998
mq04cag010b	h	Camión con grúa de hasta 10 t.	0.188	\$ 106,249	\$ 19,975
mq01ret020b	h	Retrocargador sobre neumáticos, de 70 kW.	0.119	\$ 69,141	\$ 8,228
mq02rop020	h	Pisón vibrante de guiado manual, de 80 kg, con placa de 30x30 cm, tipo rana.	0.622	\$ 6,650	\$ 4,136
mo041	h	Oficial 1ª obra blanca de obra civil.	0.392	\$ 13,603	\$ 5,332
mo087	h	Ayudante de obra blanca de obra civil.	0.188	\$ 10,111	\$ 1,901
	%	Herramienta menor	2.000	\$ 3,316	\$ 6,631
				Total	\$ 338,196

Fuente: Generador de Precios Colombia, 2019

Tabla 37 – Costo total de conexión Colector Principal 24 Pulgadas – Sin SUDS – Ubicación No.1

Ubicación	Longitud Tubería (m)	Precio instalación / m	Total
Usaquén (1)	500	\$ 338,196	\$ 169,098,000

## 6.4.1.2 Ubicación No.2 – Sin implementación de SUDS

Tabla 38 - APU Colector de 27 pulgadas – Sin SUDS – Ubicación No.2

Colector de 27 pulgadas					
Descompuesto	Ud.	Descomposición	Rend.	Precio unitario	Precio partida
mt11ade020m	m	Tubo para saneamiento de PVC de doble pared, la exterior corrugada y la interior lisa, color teja RAL 8023, diámetro nominal 660 mm, diámetro exterior 685 mm, diámetro interior 625 mm, rigidez anular nominal 8 kN/m <sup>2</sup> , coeficiente de fluencia inferior a 2, longitud nominal 6 m, unión por copa con junta elástica de EPDM.	1.050	\$ 378,956	\$ 397,904
mt11ade100a	kg	Lubricante para unión mediante junta elástica de tubos y accesorios.	0.016	\$ 22,885	\$ 366
mt01ara010	m <sup>3</sup>	Arena de 0 a 5 mm de diámetro.	0.770	\$ 25,971	\$ 19,998
mq04cag010b	h	Camión con grúa de hasta 10 t.	0.188	\$ 106,249	\$ 19,975
mq01ret020b	h	Retrocargador sobre neumáticos, de 70 kW.	0.119	\$ 69,141	\$ 8,228
mq02rop020	h	Pisón vibrante de guiado manual, de 80 kg, con placa de 30x30 cm, tipo rana.	0.622	\$ 6,650	\$ 4,136
mo041	h	Oficial 1ª obra blanca de obra civil.	0.392	\$ 13,603	\$ 5,332
mo087	h	Ayudante de obra blanca de obra civil.	0.188	\$ 10,111	\$ 1,901
	%	Herramienta menor	2.000	\$ 3,316	\$ 6,631
				Total	\$ 464,472

Fuente: Generador de Precios Colombia, 2019

Tabla 39 – Costo total de conexión Colector Principal 27 Pulgadas – Sin SUDS – Ubicación No.2

Ubicación	Longitud Tubería (m)	Precio instalación / m	Total
Simón Bolívar (2)	500	\$ 464,472	\$ 232,236,000

## 6.4.1.3 Ubicación No.3 – Sin implementación de SUDS

Tabla 40 - APU Colector de 20 pulgadas – Sin SUDS – Ubicación No.3

Colector de 20 pulgadas					
Descompuesto	Ud.	Descomposición	Rend.	Precio unitario	Precio partida
mt11tpb030h	m	Tubo de PVC liso, para saneamiento enterrado sin presión, serie SN-4, rigidez anular nominal 4 kN/m <sup>2</sup> , de 500 mm de diámetro exterior y 12,2 mm de espesor.	1.050	\$ 178,047	\$ 186,950
mt11var009	l	Líquido limpiador para pegado mediante adhesivo de tubos y accesorios de PVC.	0.024	\$ 36,114	\$ 867
mt11var010	l	Adhesivo para tubos y accesorios de PVC.	0.012	\$ 50,041	\$ 600
mt01ara010	m <sup>3</sup>	Arena de 0 a 5 mm de diámetro.	0.614	\$ 25,971	\$ 15,946
mq01ret020b	h	Retrocargador sobre neumáticos, de 70 kW.	0.087	\$ 69,141	\$ 6,015
mq02rop020	h	Pisón vibrante de guiado manual, de 80 kg, con placa de 30x30 cm, tipo rana.	0.496	\$ 6,650	\$ 3,298
mo041	h	Oficial 1ª obra blanca de obra civil.	0.314	\$ 13,603	\$ 4,271
mo087	h	Ayudante de obra blanca de obra civil.	0.151	\$ 10,111	\$ 1,527
	%	Herramienta menor	2.000	\$ 2,195	\$ 4,389
				Total	\$ 223,864

Fuente: Generador de Precios Colombia, 2019

Tabla 41 – Costo total de conexión Colector Principal 20 Pulgadas – Sin SUDS – Ubicación No.3

Ubicación	Longitud Tubería (m)	Precio instalación / m	Total
Bosa (3)	500	\$ 223,864	\$ 111,932,000

## 6.4.2 Análisis de costo colector principal de la Ciudadela – Con SUDS

En este apartado, se realizó el análisis de costos correspondientes al colector pluvial que conecta cada urbanización con la implementación de SUDS para cada una de las ubicaciones como se muestra a continuación.

## 6.4.2.1 Ubicación No.1 y No.2 – Con implementación de SUDS

*Tabla 42 – Costo total de conexión Colector Principal 20 Pulgadas – Con SUDS --  
Ubicación No.1 y No.2*

Ubicación	Longitud Tubería (m)	Precio instalación / m	Total
Usaquén (1)	500	\$ 223,864	\$ 111,932,000
Simón Bolívar (2)	500	\$ 223,864	\$ 111,932,000

## 6.4.2.2 Ubicación No.3 – Con implementación de SUDS

*Tabla 43 - APU Colector de 18 pulgadas – Con SUDS – Ubicación No.3*

Colector de 18 pulgadas					
Descompuesto	Ud.	Descomposición	Rend.	Precio unitario	Precio partida
mt11tpb030h	m	Tubo de PVC liso, para saneamiento enterrado sin presión, serie SN-4, rigidez anular nominal 4 kN/m <sup>2</sup> , de 500 mm de diámetro exterior y 12,2 mm de espesor.	1.050	\$ 178,047	\$ 186,950
mt11var009	l	Líquido limpiador para pegado mediante adhesivo de tubos y accesorios de PVC.	0.024	\$ 36,114	\$ 867
mt11var010	l	Adhesivo para tubos y accesorios de PVC.	0.012	\$ 50,041	\$ 600
mt01ara010	m <sup>3</sup>	Arena de 0 a 5 mm de diámetro.	0.614	\$ 25,971	\$ 15,946
mq01ret020b	h	Retrocargador sobre neumáticos, de 70 kW.	0.087	\$ 69,141	\$ 6,015
mq02rop020	h	Pisón vibrante de guiado manual, de 80 kg, con placa de 30x30 cm, tipo rana.	0.496	\$ 6,650	\$ 3,298
mo041	h	Oficial 1ª obra blanca de obra civil.	0.314	\$ 13,603	\$ 4,271
mo087	h	Ayudante de obra blanca de obra civil.	0.151	\$ 10,111	\$ 1,527
	%	Herramienta menor	2.000	\$ 2,195	\$ 4,389
				Total	\$ 223,864

Fuente: Generador de Precios Colombia, 2019

*Tabla 44 – Costo total de conexión Colector Principal 18 Pulgadas – Con SUDS --  
Ubicación No.3*

Ubicación	Longitud Tubería (m)	Precio instalación / m	Total
Bosa (3)	500	\$ 59,540	\$ 29,770,000

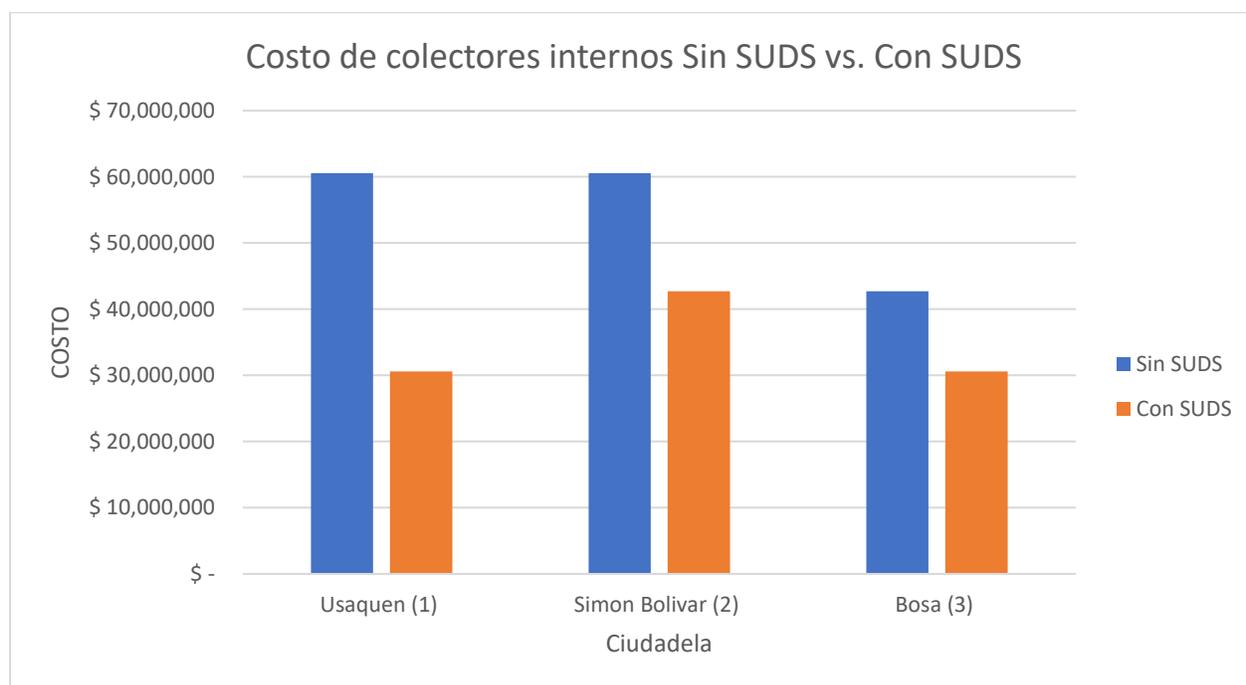
## 7. CONCLUSIONES – ANÁLISIS FINAL

En primera instancia, se realizó el análisis del costo por cada uno de los SUDS implementados y analizados como se presenta a continuación.

### 7.1 Costo comparativo de los colectores internos

Se consideran colectores internos a la conexión desde el tanque de almacenamiento de agua para reutilización hasta conexión de colector principal de la ciudadela. (Ver Figura 58).

*Figura 60 – Costo Comparativo – Conexión desde salida tanque de almacenamiento a colector principal de la urbanización*



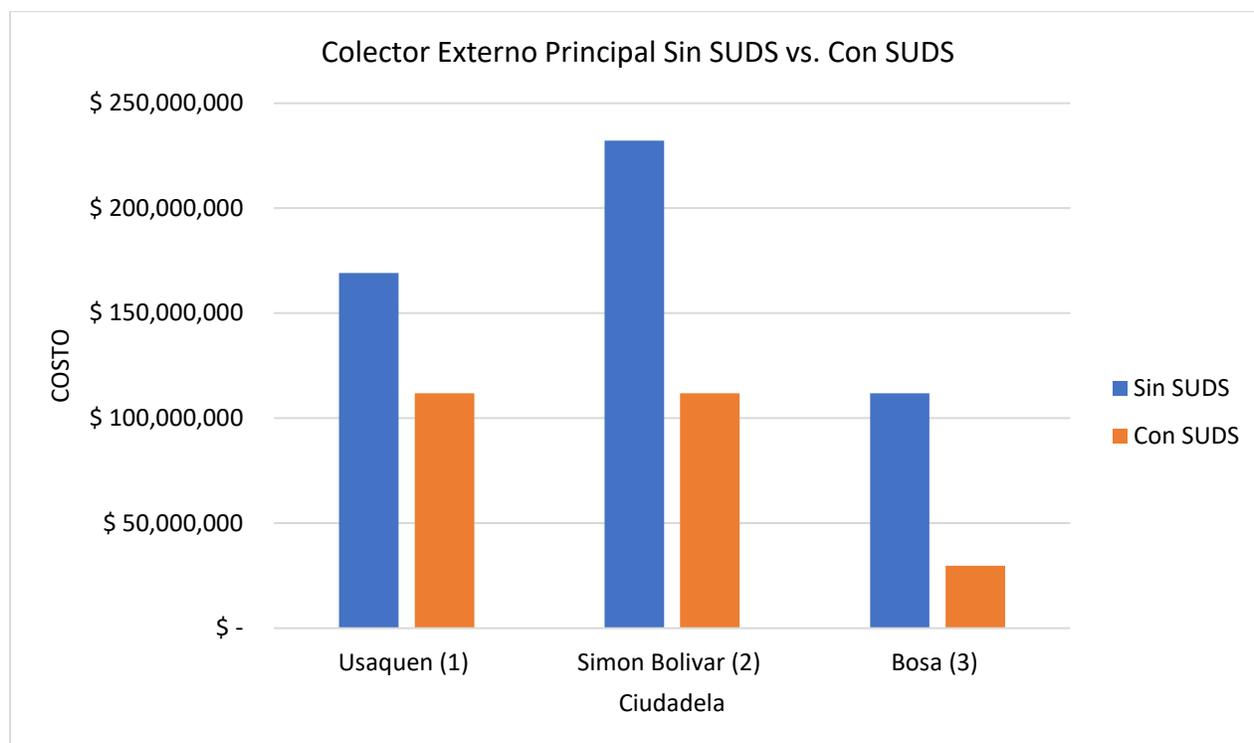
*Tabla 45 – Diferencia comparativa de colectores internos Sin SUDS vs. Con SUDS*

Ubicación	Diferencia (Posible ahorro)
Usaquén (1)	\$ 29,982,789
Simón Bolívar (2)	\$ 17,870,508
Bosa (3)	\$ 12,112,281

## 7.2 Costo comparativo del colector principal de la urbanización

Se considera colector principal de la urbanización, a la tubería pluvial en la cual se conectan la salida de los colectores internos de cada ciudadela.

*Figura 61 – Costo Comparativo – Conexión colector principal de la urbanización*



*Tabla 46 – Diferencia comparativa colector principal (Urbanización) Sin SUDS vs. Con SUDS*

Ubicación	Diferencia (Posible ahorro)
Usaquén (1)	\$ 57,166,000
Simón Bolívar (2)	\$ 120,304,000
Bosa (3)	\$ 82,162,000

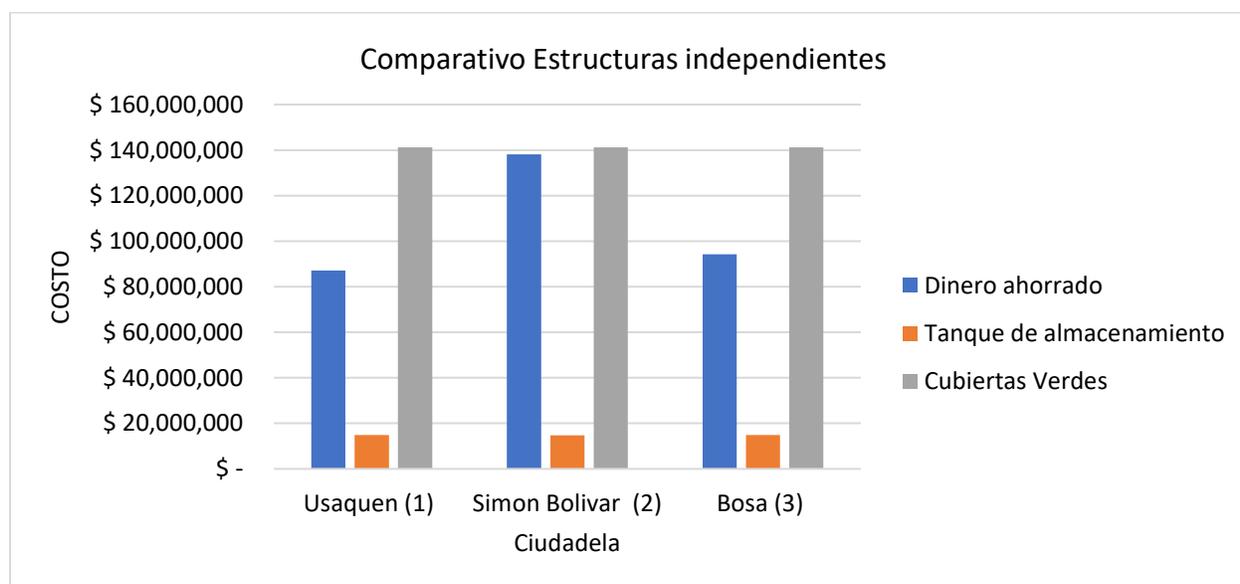
### 7.3 Costo comparativo entre la implementación de estructuras independientes (Cubiertas verdes y tanque de almacenamiento) con el ahorro de los colectores internos y externos

Este apartado contiene la comparación entre la diferencia ahorrada con la implementación de los SUDS vs la implementación de las estructuras independientes (cubiertas verdes y tanque de almacenamiento). Se debe resaltar que las estructuras independientes son necesarias para el completo desarrollo del sistema de drenaje pluvial con SUDS.

*Tabla 47 – Análisis de costo: Dinero ahorrado por la implementación de SUDS en colectores internos y colector principal vs. Construcción de estructuras independientes necesarias para el sistema general*

Ubicación	Colectores Internos	Colector principal externo	Costo Tanque de almacenamiento	Cubiertas Verdes
Usaquén (1)	\$ 29,982,789	\$ 57,166,000	\$ 14,857,277.86	\$ 141,242,530
Simón Bolívar (2)	\$ 17,870,508	\$ 120,304,000	\$ 14,680,024.63	\$ 141,242,530
Bosa (3)	\$ 12,112,281	\$ 82,162,000	\$ 14,947,774.78	\$ 141,242,530

*Figura 62 – Costo Comparativo – Ahorro de dinero vs. Estructuras independientes*



#### 7.4. Proyección del costo de agua ahorrada por la implementación de los SUDS vs. Construcción de SUDS.

A continuación, se advierte la proyección para cuantificar a los cuantos años del agua ahorrada se logra pagar el costo de la implementación de los SUDS en cada urbanización.

*Tabla 48 – Costo total de la infraestructura con SUDS*

Total, CON SUDS	\$ 6,053,913,155.27
Total, SIN SUDS	\$ 677,077,556

El análisis respectivo se realizó con base a la Tabla 22, la cual se vuelve a mencionar a continuación:

*Tabla 22 – Proyección de ahorro del agua según lo almacenado por medio de SUDS*

Estrato	Costo [\$/m3] - 2019	Volumen almacenado [m3]	Costo de agua ahorrada [mensual-\$]	Costo de agua ahorrada [Anual-\$]
1	779.20	12,2	9.476,55	113.719
4	2218.53	11,4	25.283,90	303.407
6	4306.57	9,1	39.243,60	470.923

Fuente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP

*Tabla 49 – Cuantificación de los años en los que se retornaría la inversión*

Ubicación	Costo de agua ahorrada [Anual]	Costo Totalidad SUDS	No. De años para recuperar la inversión
Usaquén (1)	\$ 113,719	\$ 2,041,349,876.86	17950
Simón Bolívar (2)	\$ 303,407	\$ 2,053,284,904.63	6767
Bosa (3)	\$ 470,923	\$ 1,959,278,373.78	4160

### **7.5 Alternativas de viabilidad a la instalación de los SUDS en la totalidad de los proyectos.**

Con la premisa de que se necesita generar una viabilidad del sistema pluvial integrando los elementos indispensables de los SUDS asegurando el correcto funcionamiento del sistema, a continuación se presenta el análisis de posibles alternativas que se pueden implementar para viabilizar la implementación de las tipologías independientemente de su estrato social.

Es importante mencionar que las estructuras necesarias para el correcto desarrollo del sistema y que son invariantes en el análisis de alternativas de viabilidad de la implementación de los SUDS ya que siempre deben estar incluidas en el análisis son:

- Tanque de almacenamiento de aguas lluvias: Eje central de la investigación, ya que con él se generará el almacenamiento de agua, la cual se reflejará en un ahorro de costos para los usuarios y manifestado en la amortiguación del costo de la implementación e instalación de los sistemas de drenaje sostenibles (SUDS).
- Bajantes de aguas lluvias: Como se pudo analizar, el diámetro de las bajantes de agua lluvias, son invariantes ya que la capacidad hidráulica de estas siempre será más que suficiente, debido a su orientación vertical y su conducción por medio de la fuerza de la gravedad.
- Colectores de conexión entre tanque de almacenamiento y colector exterior: conexión que será necesaria para evacuar el excedente (sistema de rebose) del agua que no se almacena en el tanque de almacenamiento de aguas lluvias y conduce esta agua a la conexión externa al colector principal de la ciudadela.

Con base en el análisis, se muestra en la Tabla 50, el resumen del costo en la totalidad del proyecto con y sin la implementación de SUDS, con el cual se generó el análisis que se expone posteriormente.

*Tabla 50 – Resumen costo de sistema de drenaje con y sin SUDS*

ITEM	Usaquen (1)		Simon Bolivar (2)		Bosa (3)	
	Con SUDS	Sin SUDS	Con SUDS	Sin SUDS	Con SUDS	Sin SUDS
<b>Cubiertas verdes</b>	\$ 1,412,425,300.00	\$ -	\$ 1,412,425,300	\$ -	\$ 1,412,425,300.00	\$ -
<b>Cunetas verdes</b>	\$ 471,557,400	\$ -	\$ 471,557,400	\$ -	\$ 471,557,400	\$ -
<b>Tanque</b>	\$ 14,857,278	\$ -	\$ 14,680,025	\$ -	\$ 14,947,775	\$ -
<b>Colector interior</b>	\$ 30,577,899	\$ 60,560,688	\$ 42,690,180	\$ 60,560,688	\$ 30,577,899	\$ 42,690,180
<b>Colector exterior</b>	\$ 111,932,000	\$ 169,098,000	\$ 111,932,000	\$ 232,236,000	\$ 29,770,000	\$ 111,932,000
<b>Total</b>	\$ 2,041,349,876.86	\$ 229,658,688.00	\$ 2,053,284,904.63	\$ 292,796,688.00	\$ 1,959,278,373.78	\$ 154,622,180.00

### 7.5.1 Alternativa No.1: No integrar las cubiertas verdes en los proyectos

Como se pudo evidenciar en la Tabla 50, el costo de las cubiertas verdes genera un aumento considerable en el sistema de drenaje pluvial, lo que puede determinar la viabilidad de la instalación del sistema pluvial con SUDS en los proyectos. En esta línea, a continuación se observa el costo de la implementación de las cubiertas por cada una de las urbanizaciones (Ver Tabla 51).

*Tabla 51 - Costo Total Cubiertas Verdes*

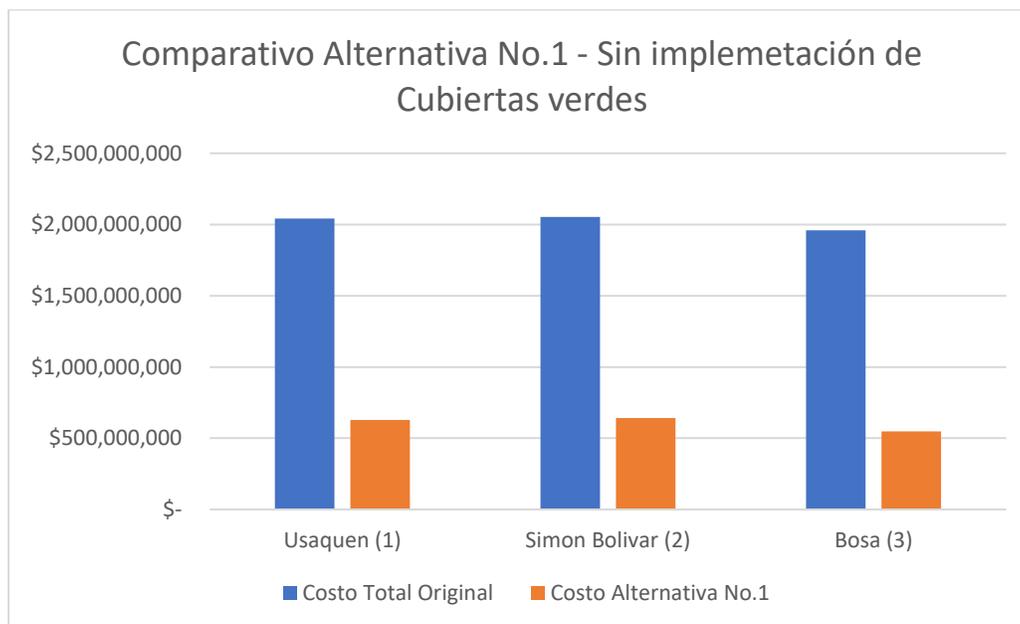
Localidad	Área de aplicación Cubiertas verdes m2	Precio de instalación por m <sup>2</sup>	Total
Usaquén (1)	559	\$ 252,670	\$ 141,242,530.00
Simón Bolívar (2)	559	\$ 252,670	\$ 141,242,530.00
Bosa (3)	559	\$ 252,670	\$ 141,242,530.00

Con base a los costos mostrados anteriormente, y la alternativa de no implementar este componente dentro del sistema pluvial en la Tabla 52 y Figura 63, se muestra el costo ahorrado al no implementar esta tipología.

*Tabla 52 – Comparación de alternativa de viabilidad – Sin implementación de Cubiertas verdes*

ITEM	Usaquen (1)		Simon Bolivar (2)		Bosa (3)	
	Con SUDS	Sin SUDS	Con SUDS	Sin SUDS	Con SUDS	Sin SUDS
<b>Cunetas verdes</b>	\$ 471,557,400	\$ -	\$ 471,557,400	\$ -	\$ 471,557,400	\$ -
<b>Tanque</b>	\$ 14,857,278	\$ -	\$ 14,680,025	\$ -	\$ 14,947,775	\$ -
<b>Colector interior</b>	\$ 30,577,899	\$ 60,560,688	\$ 42,690,180	\$ 60,560,688	\$ 30,577,899	\$ 42,690,180
<b>Colector exterior</b>	\$ 111,932,000	\$ 169,098,000	\$ 111,932,000	\$ 232,236,000	\$ 29,770,000	\$ 111,932,000
<b>Total</b>	\$ 628,924,576.86	\$ 229,658,688.00	\$ 640,859,604.63	\$ 292,796,688.00	\$ 546,853,073.78	\$ 154,622,180.00

*Figura 63 – Ilustración Comparativa de alternativa de viabilidad – Sin implementación de Cubiertas verdes<sup>4</sup>*



*Tabla 53 - Análisis Total Alternativa No. 1 de viabilidad*

	Usaquén (1)	Simón Bolívar (2)	Bosa (3)
Original	\$ 2,041,349,877	\$ 2,053,284,905	\$ 1,959,278,374
Alternativa No.1	\$ 628,924,577	\$ 640,859,471.762	\$ 546,852,827.096
Diferencia	\$ 1,412,425,300	\$ 1,412,425,300	\$ 1,412,425,300

Como se puede observar en la Tabla 53, el costo del sistema pluvial incluyendo todas las tipologías de SUDS menos las cubiertas verdes (Alternativa No.1), genera un ahorro sustancial, lo que determina una muy buena viabilidad del proyecto.

<sup>4</sup> **Nota:** Se aclara que el costo total original, hace referencia al costo implementando la totalidad de los SUDS propuestos.

### 7.5.2 Alternativa No.2: No integrar las zanjas de infiltración en los proyectos y cambiarla por filtros en las zonas verdes

Con base a la funcionalidad de las zanjas de infiltración, estas pueden ser reemplazadas por la implementación de filtros en forma de espina de pescado, con el fin de drenar las zonas verdes en las cuales están proyectadas las zanjas. En virtud de ello, se propone en esta alternativa de viabilidad, el cambio mencionado, con la premisa de que se reducen costos de cierta manera y el funcionamiento hidráulico es muy similar.

En la Figura 64 se puede observar la alternativa planteada la cual consta de una serie de filtros en forma de espina de pescado, los cuales que se conectan al sistema de drenaje general interno de la urbanización y en la Tabla 54 el costo por metro lineal de filtro para drenar zonas verdes. Cabe resaltar que la totalidad del filtro es de 319,12 m lineales y es el valor base para análisis.

Figura 64 – Alternativa para drenaje zonas verdes con filtro



*Tabla 54 – APU – Filtro para drenar zonas verdes*

Filtro drenante con geotextil NT 1600					
Descompuesto	Unidad	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
mt01are010a	m <sup>3</sup>	Grava de cantera de piedra caliza, de 40 a 70 mm de diámetro.	0.250	\$ 36,775	\$ 9,194
mt01geot010b	m <sup>2</sup>	Geotextil no tejido 1600	2.500	\$ 6,340	\$ 15,850
mq01pan010a	h	Pala cargadora sobre neumáticos de 120 kW/1,9 m <sup>3</sup> .	0.012	\$ 76,165	\$ 914
mq02cia020j	h	Camión cisterna de 8 m <sup>3</sup> de capacidad.	0.012	\$ 76,153	\$ 914
mq02rod010d	h	Bandeja vibrante de guiado manual, de 300 kg, anchura de trabajo 70 cm, reversible.	0.012	\$ 12,141	\$ 146
mo113	h	Peón de obra blanca.	0.268	\$ 9,714	\$ 2,603
	%	Herramienta menor	2.000	\$ 15,996	\$ 320
				<b>Total</b>	<b>\$ 29,940</b>

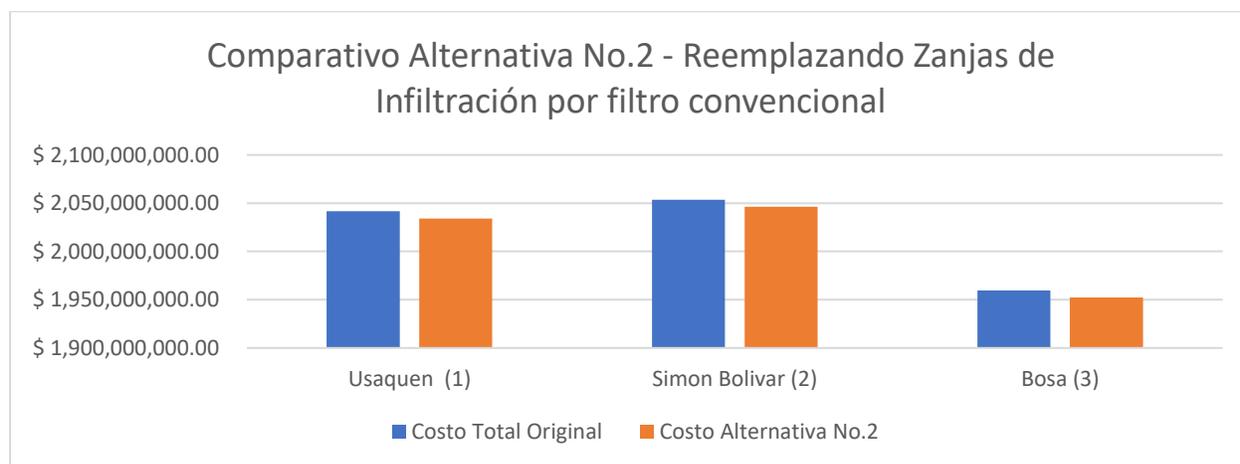
Fuente: Generador de Precios Colombia, 2019

*Tabla 55 – APU – Costo total – Filtro para drenar zonas verdes*

Ubicación	Longitud Filtro (m)	Precio instalación / m	Total
Usaquén (1)	319.12	\$ 22,940	\$ 7,320,613
Simón Bolívar (2)	319.12	\$ 22,940	\$ 7,320,613
Bosa (3)	319.12	\$ 22,940	\$ 7,320,613

En la Figura 65 se puede observar la comparación de manera gráfica del ahorro al implementar un filtro en espina de pescado para reemplazar las zanjas de infiltración.

*Figura 65 – Ilustración Comparativa de alternativa de viabilidad – Reemplazando las zanjas de infiltración por filtros en forma de espina de pescado*



**Nota:** Se aclara que el costo total original, hace referencia al costo implementando la totalidad de los SUDS propuestos.

*Tabla 56 - Análisis Total Alternativa No. 2 de viabilidad*

	Usaquén (1)	Simón Bolívar (2)	Bosa (3)
Original	\$ 2,041,584,263	\$ 2,053,519,007	\$ 1,959,512,362
Alternativa No.2	\$ 2,034,263,651	\$ 2,046,198,394	\$ 1,952,191,750
Diferencia	\$ 7,320,613	\$ 7,320,613	\$ 7,320,613

Como se puede observar en la Tabla 56, el costo del sistema pluvial incluyendo todas las tipologías de SUDS y solamente cambiando las zanjas por infiltración por filtros en espina de pescado (Alternativa No.2), genera un ahorro **No representativo**. Al respecto, se concluye que no es un factor influyente para una viabilidad de la implementación de los SUDS.

## 7.6. Conclusiones específicas del análisis

Como se puede observar, el análisis anteriormente descrito en esta investigación genera una aclaración en la implementación de los SUDS como un sistema que ayuda a manejar picos en los hidrogramas de entrada de los drenajes, a continuación, se mencionarán los aspectos más importantes en el desarrollo de este producto final:

### 7.6.1 Análisis de costos en la totalidad del sistema inicial propuesto (totalidad de las tipologías SUDS)

- Como se pudo observar, la implementación de SUDS eleva en gran manera los costos de un proyecto, en donde no se evidencia viable en estratos bajos, ya que, en la mayoría de los casos, se trata de construcciones industrializadas que buscan volver de manera eficiente la construcción de las viviendas.
- En cualquier proyecto, se busca optimizar los costos del desarrollo de este. Lo anterior, permite afirmar que al querer implementar los SUDS se podrá evaluar cuál de las tipologías se ajusta al presupuesto de la construcción. Un claro ejemplo de ello, es que podríamos evaluar no adoptar las cubiertas verdes (Ver 7.5.1 Alternativa No.1: No integrar las cubiertas verdes en los proyectos), ya que su costo es muy elevado y no es una estructura necesaria para el funcionamiento del sistema de drenaje pluvial.
- Es indispensable que se reconozca que la implementación de los SUDS sube de gran manera los costos de un proyecto, y teniendo en cuenta que es una

metodología relativamente reciente en Colombia, es posible que haya una mayor implementación temporal al conocer las ventajas de tener estos sistemas de drenaje, por lo cual reducirá el costo de la instalación de estos.

- Según la Tabla 49 se puede analizar que el tiempo de retorno de la inversión es demasiado alta, es decir, que el costo analizado del agua ahorrada con el costo que se deberá tener para realizar la infraestructura de los SUDS (inversión), se recuperaría en una temporalidad alta, lo que representa una no viabilidad de un proyecto de la actualidad.
- Se convierte inviable la instalación de los SUDS propuestos en el proyecto, no solo por los costos de instalación, sino por los costos de operación y mantenimiento a través de los años. Esto se debe a que en Colombia la industria de estos sistemas es escasa y ello genera exclusividad en el mercado lo que se ve representado en altos costos.
- Para proyectos de aprovechamiento de aguas pluviales en zonas urbanas por medio de SUDS, se hace inviable debido a los altos costos que estos implican; sin embargo, si el proyecto tiene como objetivo primario reducir los picos entre los hidrogramas de entrada y salida, se puede considerar en utilizarlos, ya que el presente estudio demuestra una buena eficiencia en la reducción de picos, generando en sí, una optimización en los sistemas de drenaje.

#### 7.6.2 Análisis de alternativas de viabilidad de la implementación de SUDS

El presente análisis, representa el fundamento del informe, en el cual se establece la búsqueda de viabilizar la implementación de los SUDS en cualquier ubicación en la ciudad de Bogotá independientemente a su estrato social.

- Actualmente, el costo de las cubiertas verdes en Colombia genera un alza en el precio final de la construcción de un proyecto, esto, independientemente a la ubicación en la ciudad de Bogotá.

En virtud de lo anterior, se concluye que, al implementar esta tipología, genera una inviabilidad del proyecto en su totalidad, ya que el costo es bastante elevado y no se alcanza a amortiguar el precio con el ahorro del agua captada en el tanque de almacenamiento de aguas lluvias. a lo largo de los años en que se tiene proyectada la vida útil del sistema de drenaje pluvial.

Por lo cual, la Alternativa de viabilidad No.1, es la elegida para poder realizar el proyecto en cualquier estrato en la Ciudad de Bogotá con la implementación de los SUDS; en donde el costo del sistema de drenaje pluvial propuesto para la ciudadela se puede observar a continuación en la Tabla 57.

*Tabla 57 – Costo total del sistema de drenaje pluvial con base a la alternativa No.1 de viabilidad.*

	<b>Usaquén (1)</b>	<b>Simón Bolívar (2)</b>	<b>Bosa (3)</b>
Alternativa No.1	\$ 628,924,577	\$ 640,859,605	\$ 546,853,074

- El costo de las zanjas de infiltración y un sistema de drenaje compuesto por un filtro en forma de espina de pescado, tienen un costo relativamente similar, por lo que cada constructor determinará qué tipo de sistema le es más eficiente según su criterio ya que la funcionalidad hidráulica es la misma.

Adicionalmente, desde el punto de vista constructivo, las zanjas de infiltración pueden tener una labor más complicada comparada con la instalación de un filtro en la zona verde.

- Se puede concluir, que independientemente de la ubicación del proyecto, cada construcción es totalmente diferente, debido a que existen diversos factores que pueden impedir o viabilizar un proyecto, por lo que se deberá siempre buscar el equilibrio entre la optimización de los recursos y la funcionalidad de los sistemas.
- La implementación de los SUDS, logran mejorar la calidad de agua antes de ser vertida en el punto final que se prevé; en virtud de ello, se deberá hacer un estudio adicional antes de ser vertido el recurso hídrico, con el objeto de determinar que tanto se mejora la calidad del agua al implementar las tipologías de los SUDS ya mencionadas, esto, con el fin de poder cuantificar el ahorro en el tratamiento del agua previo a su disposición final.
- Se debe tener en cuenta que en Colombia no se ha generado una implementación de manera industrializada de los SUDS, por lo que actualmente se refleja en el costo elevado de instalación. Cabe resaltar, que, en un futuro próximo, estos sistemas que ayudan a optimizar el recurso hídrico serán más utilizados y el costo será mucho menor al actual; por lo que se deberá seguir creando conciencia en la utilización del recurso hídrico y siempre buscar la manera de generar el menor gasto dándole el mejor uso al agua.

Para finalizar el informe, se puede concluir que los Sistemas de Drenaje Urbanos Sostenibles son una muy buena alternativa para encontrar el equilibrio entre optimizar un recurso y darle un segundo uso al mismo, para generar un ahorro de este, el cual se refleja en una disminución en costos. Por otro lado, es una manera propicia para amortiguar los picos de entrada al sistema pluvial y optimizar en el diseño, y así mismo ayudar al medio ambiente al mejorar la calidad de agua producida por la escorrentía, reduciendo de la cantidad de contaminantes que llegan al medio receptor.

## 7.7 Recomendaciones

### 7.7.1 Análisis constructivo y de operación

- Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) requieren de un alto grado de precisión en cuanto a los aspectos constructivos, tanto de las tipologías principales, como de las estructuras anexas asociadas a éstas. Una construcción adecuada con materiales idóneos afectará de manera positiva el desempeño de las estructuras, en cuanto al control de volúmenes de escorrentía, mejoramiento de calidad del agua, creación de paisaje y percepción de amenidad, entre otros.
- La construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en áreas desarrolladas exige que el constructor identifique claramente en qué condiciones se encuentra el sistema de drenaje preexistente y cómo es la dinámica del entorno con este sistema.
- Si la implementación de la tipología se hace en un área desarrollada, se recomienda identificar la red de drenaje existente o proyectada, conocer de manera detallada las especificaciones y/o estado del sistema y su disposición en el área de interés con el objetivo de disminuir costos de instalación e imprevistos por daños de tuberías o conexiones erradas.
- Se recomienda proveer un sistema complementario de rebose/descarga o estructuras de alivio para las tipologías seleccionadas y aplicadas al área de influencia, con el fin de evacuar los excesos provenientes de eventos extremos de precipitación, que puedan generar inundaciones y afectar la estabilidad de la tipología.
- Para las tipologías que incluyan una capa de drenaje, es fundamental validar que la porosidad y tasas de infiltración del medio granular para garantizar la eficiencia de la estructura. La roca de relleno (si aplica) debe ser lavada antes de la construcción, para evitar colmatación prematura de las estructuras.
- Para las estructuras de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), que incluyan uso y adecuación de cobertura vegetal, se debe garantizar que el espesor sea el necesario para evitar sobredimensionar el sistema, aumento de costos de instalación y afectar la estabilidad de la estructura, lo que se refleja en aumentos de costos.
- Si la construcción de la tipología incluye instalación de Geomembrana o geotextil, se deberá verificar que su desempeño sea adecuado, ya que los daños mecánicos como desgarros, pueden ser recurrentes durante la ejecución de procesos constructivos, debido a enganches inadecuados o asperezas de la superficie intervenida.

- Una vez instalado el sistema de drenaje, es necesario comprobar su operación de diseño, de tal manera que los caudales de entrada y salida correspondan a los rangos de diseño previstos y verificar que la vegetación existente se encuentra en buen estado y cumpliendo con funciones de limpieza y mejoramiento de la calidad del agua.

#### 7.7.2 Análisis del programa computacional EPA SWMM

- Tiene la ventaja de que la precipitación puede ser analizada por varios métodos: Intensidad, volumen y valores acumulados; lo que le da al usuario la facilidad de implementar la metodología que sea necesaria en cada análisis.
- Se puede realizar un análisis de la calidad del agua al final de la descarga, con el objeto de poder comparar cual es el efecto de aplicar los SUDS en una cuenca urbana.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- (EAAB), E. d. (s.f.). *Catálogo de curvas IDF - Ciudad de Bogotá*. EAAB.
- Abellán, A. (25 de Abril de 2014). *SuD Sostenible*. Obtenido de <http://sudsostenible.com/tipos-de-cunetas-verdes/>
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. . (s.f.). *EPA*. Obtenido de <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm#tab-3>
- Agua, C. N. (2007). *MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO - ALCANTARILLADO PLUVIAL*.
- Cordoba, J. D. (Agosto de 2016). Descripción de los Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible como estrategia para la mejora de la calidad de vida humana y prevención de inundaciones. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia.
- Díaz, H. A. (2005). *Diseños Hidráulicos, Sanitario y de Gas en Edificaciones*. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de ingeniería.
- DINERO, R. (2016). *El Caso de éxito de Groncol, una empresa verde innovadora*. Bogotá.
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (9 de Febrero de 2018). Criterios para diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia.
- Fandiño, E. A. (2014). Evaluación de una cubierta verde como sistema de drenaje urbano sostenible. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia.
- Hidromet. (2018). *Brollo Solar*. Santiago.
- Ministerio de vivienda, Ciudad y Territorio. (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia .
- Rodriguez, A. M. (Junio de 2017). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible: Hacia una gestión integral del ciclo urbano del agua*. Madrid, España.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (Diciembre de 2011). *Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible SUDS para ordenamiento zonal norte poz. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia*.
- Universidad de los Andes. (12 de Junio de 2017). Investigación de las 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. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia.

ANEXO No.1 – MODELACIONES EPA SWMM 5.1

ANEXO No. 2- INFORMACIÓN SIG

ANEXO No. 3– IDF's