

2014

Análisis de la viabilidad para la implementación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (suds) en Bogotá D.C.

Jennifer Alexandra Villarraga García
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria



Part of the [Civil and Environmental Engineering Commons](#)

Citación recomendada

Villarraga García, J. A. (2014). Análisis de la viabilidad para la implementación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (suds) en Bogotá D.C.. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/422

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Ambiental y Sanitaria by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS
URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) EN BOGOTÁ D.C.**

JENNIFER ALEXANDRA VILLARRAGA GARCÍA

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
BOGOTÁ
2014**

**ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS
URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) EN BOGOTÁ D.C.**

JENNIFER ALEXANDRA VILLARRAGA GARCÍA

**Trabajo de Grado
(Tesis)**

Director:

Beatriz Elena Ortiz Gutiérrez

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
BOGOTÁ
2014**

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	7
1. OBJETIVOS.....	9
OBJETIVO GENERAL.....	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
2. ANTECEDENTES.....	10
3. METODOLOGÍA	15
4. IDENTIFICACIÓN DE CIUDADES A NIVEL MUNDIAL CON SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS).....	18
5. EVALUACIÓN DE CONDICIONES TÉCNICAS AMBIENTALES DE CIUDADES SELECCIONADAS VS. CONDICIONES TÉCNICAS AMBIENTALES DE BOGOTÁ D.C.....	44
5.1 TIPOLOGÍAS SUDS APLICADAS	44
5.2 CRITERIOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	49
5.3 IMPLEMENTACIÓN, EJECUCIÓN E INCENTIVOS	60
5.4 CONDICIONES AMBIENTALES LOCALES DE BOGOTÁ D.C.....	69
6. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.....	80
7. CONCLUSIONES.....	89
8. REFERENCIAS.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Inundaciones en Bogotá.....	12
Figura 2. Zona de Confluencia Intertropical	19
Figura 3. Zanja de Infiltración, Zanja de retención y Depósito de sedimentos y escombros.....	21
Figura 4. Estanque de atenuación de Inundaciones en Belo Horizonte, Brasil	22
Figura 5. Componentes dentro del Sistema.	29
Figura 6. Entradas y Salidas por componentes.	29
Figura 7. Ejemplo de un jardín de tormenta implementado en Chicago (Illinois)	34
Figura 8. Zona de parqueo permeable en Gijón y pavimento permeable en San Sebastián.	40
Figura 9. Cuneta verde, Estanque de retención y campo de fútbol integrado en un depósito en Lyon.....	43
Figuras 10 y 11 - Conducción de aguas captadas mediante tubería o módulos de drenaje y capas en sistema de pavimentos permeables	49
Figura 11. Mantenimiento de cunetas.....	59
Figura 12. Imágenes de Bogotá.....	70
Figura 13. Consolidado de precipitaciones anuales en Bogotá entre 1998 y 2013.	72
Figura 14. Extensión del suelo en Bogotá por localidades.....	77
Figura 15. Extensión y Composición del suelo en la capital.	78
Figura 16. Composición del suelo Urbano en Bogotá.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Países y ciudades seleccionados al interior de la ZCIT.....	19
Tabla 2. Países y ciudades seleccionados fuera de la ZCIT.	31
Tabla 3. Medidas no estructurales de SUDS.....	45
Tabla 4. Medidas estructurales de SUDS.	45
Tabla 5. Mínimos de Selección frente al diseño de SUDS. Fuente: (NILSA, 2010).....	51
Tabla 6. Consolidado de regímenes de precipitación anuales medias de las ciudades seleccionadas.	53
Tabla 7. Selección de nivel de recurrencia según objetivo de diseño.	53
Tabla 8. Características requeridas para la pre-selección de SUDS.	55
Tabla 9. Mecanismos de eliminación de contaminantes para SUDS.	56
Tabla 10 - Condiciones de Drenaje para algunas tipologías SUDS.	57
Tabla 10. Propiedades más importantes de los grupos de suelos.	58
Tabla 11. Cálculo de Incentivos para la Implementación de SUDS en Washington D.C.....	63
Tabla 12. Elementos de la planeación urbana.	67
Tabla 13. Consolidado de precipitaciones anuales en Bogotá entre 1998 y 2013.....	72
Tabla 14. Formaciones geológicas de la Sabana de Bogotá.....	73
Tabla 15 - Compilado de Información relevante por ciudades. Fuente: Autora.....	83
Tabla 16 - Matriz Multicriterio con Ponderación de Variables. Fuente: La Autora.....	88

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la oportunidad de estudiar esta carrera que desde el día que la elegí y hasta ahora, he disfrutado al máximo. A mis padres y hermano, por hacer posible la materialización de un sueño, por el apoyo permanente y la formación de casa que finalmente, me conduce a este momento. A mis amigos, William Malaver, Juan López y otros, quienes con su incondicional apoyo fueron fuente inspiradora de fortaleza y perseverancia para no fallar en el intento. A Claudia y todo el personal de Biblioteca por su diligencia en mi proceso de formación académica y su amistad. A mi familia, por ser testigo de este arduo, pero fascinante proceso. A Beatriz Ortiz, quien con su profesionalismo aportó a mi formación conocimientos académicos y personales.

A quienes hoy disfrutan conmigo esta bendición, a todos gracias.

INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible han sido ampliamente reconocidos a nivel mundial por su eficiencia en la gestión de las aguas urbanas. También conocidos como *Best Management Practices* (BMP'S), estos sistemas han traído consigo importantes avances y soluciones para amortiguar los impactos de la urbanización en algunas de las ciudades más grandes del mundo, que son derivados de la impermeabilización masiva de los suelos y que a su vez responden a las necesidades de un desarrollo demográfico en crecimiento constante.

Este trabajo tiene como propósito evaluar la viabilidad en la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en Bogotá y para ello, esta investigación se desarrolló en tres fases principales. En la primera parte, se identifican las ciudades en el mundo que han implementado SUDS. De las 12 ciudades identificadas se realiza la selección de las ciudades que cuentan con más información respecto al tema, delimitando el desarrollo de esta investigación a 2 ciudades que se localizan dentro de la Zona de Confluencia Intertropical y 9 fuera de la ZCIT. La ZCIT juega un papel importante en este estudio, ya que es el primer criterio global que se tiene en cuenta para evaluar cada una de las ciudades de acuerdo al comportamiento de la precipitación que como se describe en este capítulo, tiene un comportamiento especialmente diferente respecto a las ciudades que no se encuentran afectadas por dicha franja.

En una segunda parte, se realiza un compilado de las condiciones técnicas ambientales de las ciudades seleccionadas como son los criterios de diseño, las tipologías SUDS de dichas ciudades, la implementación, ejecución e incentivos que son analizados y comparados con las condiciones locales de la ciudad de Bogotá D.C.

Finalmente en una tercera parte, se realiza la identificación de fortaleza y debilidades respecto a la implementación de dichos sistemas y como herramienta de selección de la (s) alternativas viables para la ciudad de Bogotá se diseña una matriz de análisis multicriterio, de la que a partir de los resultados ponderados, se seleccionan las alternativas y se realiza su posterior análisis de viabilidad, identificando puntos de oportunidad y algunas situaciones que si bien no son igual de positivas, pueden ser modificadas de acuerdo a las necesidades de los capitalinos.

1. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar la viabilidad en la implementación de SUDS en la ciudad de Bogotá D.C. con referencias nacionales e internacionales para seleccionar las tipologías aplicables de acuerdo a las condiciones ambientales locales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar ciudades a nivel mundial con antecedentes respecto a los SUDS dentro y fuera de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), con el objeto de estudiarlos bajo el criterio de condiciones ambientales de precipitación y localización.
- Comparar las condiciones técnicas ambientales propias de las ciudades identificadas, además de las condiciones de diseño, implementación, ejecución e incentivos bajo las cuales se han adoptado estos sistemas con las condiciones ambientales locales para la selección de la(s) tipología(s) adaptable(s) a Bogotá D.C.
- Identificar las fortalezas y debilidades en la implementación realizada en las ciudades objeto de estudio y así consolidar la propuesta de Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para Bogotá D.C.

2. ANTECEDENTES

Si bien los sistemas convencionales de drenaje y saneamiento básico parecían satisfacer las necesidades de los crecientes centros urbanos, con el paso del tiempo dichas estructuras han llegado en su mayoría al tope de su capacidad debido a la exigente demanda de poblaciones cada vez más densas en las grandes ciudades, que inducen al incremento de los procesos de urbanización. Este desequilibrio no solo afecta la población, pues las dinámicas ambientales naturales también se ven perjudicadas seriamente tal y como lo definen Perales y Doménech cuando afirman que el continuo y rápido crecimiento de nuestras ciudades que conlleva a una progresiva impermeabilización del suelo está alterando gravemente el ciclo hidrológico natural del agua (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007)

Respecto a la identificación de factores y la evaluación de situaciones de riesgo que generan las problemáticas de drenaje urbano existen gran número y variedad de documentos elaborados que van desde la publicación de hallazgos frente al tema, hasta la manifestación de organismos gubernamentales locales e internacionales que dan su opinión al respecto. En el año 2007, se realizó en Porto Alegre Brasil, la publicación denominada *Gestión de Inundaciones Urbanas* de la autoría de Carlos E. M. Tucci dirigido a tomadores de decisión que actúan dentro del medio ambiente urbano y cuyo contenido presenta una visión integral de las aguas pluviales urbanas(TUCCI, 2007).

En esta publicación se mencionan algunos problemas asociados a la infraestructura y urbanización de los países en desarrollo. Con especial predominio en América Latina se exponen los siguientes impactos:

- La gran concentración de población en pequeñas áreas supone deficiencias en los sistemas de abastecimiento y saneamiento básico, en donde los recursos y especialmente el aire y el agua se encuentran contaminados, adicionales a las inundaciones que tienen lugar.
- El aumento de la periferia de las ciudades de manera descontrolada, dado el incremento de la población urbana proveniente en su mayoría de espacios rurales.
- La urbanización es espontánea y este proceso supera los espacios de planeación, lo que hace que la ocupación ocurra en espacios con alta situación de riesgo, propensas a inundaciones y/o deslizamientos.

Sumado a lo anterior, se observa que en cuanto al planeamiento de la infraestructura urbana, esta generalmente se realiza para los sectores de la ciudad formalmente constituidos, y para las zonas no formales se analiza apenas la posibilidad de incluirlos en las perspectivas de desarrollo urbano. Lo anterior da origen a situaciones frecuentes como la falta de tratamiento en redes de alcantarillado, redes de escurrimiento urbano sin una red de drenaje urbano que evite inundaciones y que a su vez pueda amortiguar de cierta forma la impermeabilización de los suelos, la intervención estructural de ríos urbanos alterando sus condiciones naturales y convirtiéndolos en canales y esto solo por mencionar algunos casos (TUCCI, 2007).

Bajo estas condiciones en las ciudades se crea un entorno totalmente apartado de lo natural, con dinámicas modificadas y hasta con ambientes diferentes, que se manifiestan en el rigor de los eventos climáticos extremos y cuyos sucesos son frecuentes y conocidos por los habitantes de la mayoría de las grandes ciudades del mundo: inundaciones, efecto isla de calor, pérdidas

materiales y humanas además de la contaminación de los recursos hídricos disminuyendo su oferta e incrementando el desabastecimiento de agua. Quizá uno de los puntos que cobran mayor interés en la problemática de las escorrentías urbanas es el hecho de cambiar los usos del suelo y destinar en gran medida para urbanización suelos que tiempo atrás se encontraban en condiciones total o parcialmente naturales. No es lo mismo la capacidad de infiltración que tiene un suelo con coberturas vegetales a un suelo intervenido con pavimentos y otro tipo de materiales de permeabilidad reducida casi nula. Artieda (2008) da su opinión al respecto y afirma que “El balance entre agua infiltrada y agua de escorrentía es un parámetro esencial del ciclo hidrológico, ya que esta relación determina significativamente la cantidad de agua lluvia que pasa a formar parte de las aguas superficiales, la que regresa a la atmósfera a través de evapotranspiración y la que recarga los freáticos”. Esta situación sumada a la superación de la capacidad de transporte y evacuación de los sistemas de saneamiento urbanos como los alcantarillados sanitarios, y su combinación con las aguas lluvias, con el agravante de suelos con condiciones cada vez menos permeables, constituyen el escenario más apropiado para el incremento de las escorrentías urbanas y en casos extremos, de inundaciones.



Figura 1. Inundaciones en Bogotá. Fuente:(Radio Santa Fe, 2011; Semana.com, 2011; CEET, 2011)

Ahora bien respecto al ciclo del agua Prieto Leache (2010), afirma que todas las fases del ciclo natural del agua compuesta por evaporación, condensación, precipitación e infiltración son de vital importancia para que el agua mantenga su equilibrio y el balance se mantenga para que

permita el desarrollo de un territorio sano. En contraste, el ciclo del agua que se evidencia en las ciudades es sustancialmente distinto. En primer lugar las precipitaciones deben atravesar una nube de contaminación con tantas especies que al caer, son lavados y transportados hasta la superficie. Adicionalmente, cuando escurren por la superficie, arrastran residuos y en general toda la suciedad que se encuentra en la superficie del área urbana. Luego, es combinada con aguas residuales domésticas e industriales aumentando su carga contaminante y posteriormente es transportada a plantas de tratamiento para reducir dichas cargas o peor, son vertidas a cuerpos de agua sin ningún tratamiento para nuevamente, dar inicio al ciclo (Prieto Leache, 2010).

Como solución a estos problemas, los sistemas urbanos de drenaje sostenible o SUDS, han sido catalogados en diferentes ciudades del mundo como una de las alternativas más eficientes frente a la problemática de escorrentías e inundaciones que tienen lugar en las áreas urbanas. Los SUDS han sido diseñados e implementados en diferentes ciudades del mundo, variando de acuerdo a sus características locales como son las condiciones climáticas, régimen de precipitaciones, población, entre otras variables. Ciudades como Berlín, Madrid, Valencia, y otras ciudades alrededor del mundo se han destacado por ser referentes de la implementación de dichos sistemas para otras ciudades que han conocido los beneficios y oportunidades que su implementación conlleva.

Es importante aclarar que al evaluar estos sistemas para implementarlos no busca que los procesos de desarrollo que tienen lugar en las grandes ciudades como Bogotá se detengan. Tampoco es posible empezar de cero pretendiendo una ciudad auto sostenible e ideal, ni mucho menos busca declarar obsoletos los sistemas convencionales. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible han sido creados para implementarlos con rigor en los nuevos proyectos de construcción involucrando directamente la planeación local, y en la medida de lo posible,

amortiguar los impactos negativos de las escorrentías urbanas mediante el establecimiento de estructuras y elementos que conforman las ciudades y que son de uso público, para retener y transportar el agua lluvia prolongando la vida útil de los sistemas convencionales ya establecidos y simultáneamente, sentar bases firmes para el desarrollo sostenible visto desde la perspectiva urbana. Como es mencionado por Doménech y Perales, los SUDS pueden utilizarse como alternativa a los sistemas de drenaje convencional o en combinación con ellos. (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007)

Finalmente, aunque los beneficios de estos sistemas son múltiples, las opiniones son diversas cuando se trata de los incentivos de todo tipo que para la construcción pública y privada se ofrecen. Algunos países, han incorporado incentivos no monetarios, como es el caso de varios países europeos. Martínez Soriano (2012) expone que para los constructores que incorporen tipologías alternativas para el drenaje urbano, se agilizan los procesos de otorgamientos de licencias y demás permisos, privilegiando de cierta forma su propuesta frente a las demás constructoras, y es justo en este punto donde se hace tangible el concepto de urbanismo y crecimiento urbano sostenible. Sin embargo, hay quienes afirman que implementar este tipo de medidas no es una herramienta contundente para mitigar la problemática de las inundaciones urbanas.

3. METODOLOGÍA

El presente proyecto se desarrollará empleando una metodología de tipo exploratorio correlacional de tipo cualitativo. Es un estudio exploratorio, porque se fundamenta en examinar un problema que ha sido poco estudiado en el país y del que se requiere información. Es correlacional, porque se tiene como propósito evaluar la relación que existe entre dos o más conceptos, categorías o variables (Cortés Cortés & Iglesias León, 2004)

Es así como la aplicación de esta metodología permite destacar los aspectos fundamentales de la problemática, evaluarlos a partir de criterios técnicos para establecer la viabilidad de estos sistemas en la capital, correlacionar la información existente y seleccionar la mejor alternativa de SUDS para Bogotá D.C.

En ese orden de ideas, este trabajo será desarrollado en las siguientes fases:

FASE I

En esta fase se realizará la identificación de ciudades a nivel mundial con antecedentes respecto a los SUDS dentro y fuera de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), para lograr su estudio bajo las condiciones de precipitación y localización. Esto se realizará mediante la búsqueda en bases de datos, revistas científicas, libros, artículos, tesis y demás fuentes que puedan proveer esta información. Para identificar las ciudades, primero debe reconocerse los países que están bajo la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y de estos, las ciudades que han implementado alguna tipología de SUDS. Posteriormente, se realizará el mismo procedimiento para la selección de las ciudades que no se encuentran bajo la influencia de la ZCIT. Teniendo identificadas las ciudades, tanto las afectadas por la ZCIT y las que no, se da paso a la segunda fase del proyecto.

FASE II

Para las ciudades identificadas, se hará la búsqueda de información en bases de datos, artículos, tesis y otros documentos que involucre principalmente el régimen de precipitaciones, criterios de diseño y tipología SUDS aplicada, implementación, ejecución e incentivos. Esto para las ciudades que están tanto en la ZCIT como las que no. Esto para hacer una comparación entre ellas y posteriormente seleccionar la tipología SUDS viable para Bogotá D.C. utilizando como herramienta una matriz que será elaborada en la siguiente fase.

Para Bogotá se hará la búsqueda de información correspondiente a precipitaciones, clima, red actual de evacuación y suelos en Instituciones locales como la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, el IDEAM entre otras. Esto con el fin de conocer detalladamente las condiciones actuales de la ciudad y dar soporte a la selección de SUDS con los parámetros locales, sumado a las demás condiciones previamente mencionadas.

FASE III

En esta última fase se hará la construcción de una matriz que consolide la información recopilada que será evaluada haciendo un análisis multicriterio con ponderación de variables que califica y correlaciona las variables analizadas a fin de seleccionar la mejor alternativa según las condiciones establecidas en las fases anteriores. Con esto se busca la identificación de las fortalezas y debilidades en la implementación realizada en las ciudades que ya cuentan con alguna tipología SUDS dentro y fuera de la ZCIT y de esta forma seleccionar y consolidar la propuesta viable de Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para Bogotá D.C.

Cabe aclarar que el análisis multicriterio con ponderación de variables aborda maneras distintas de jerarquizar y evaluar las variables. De ahí que se construirá la matriz siguiendo el método y de ser necesario, será adaptada a la información obtenida para que pueda ser evaluada.

Según Sampieri (2010) el reporte de resultados del proceso cualitativo puede adquirir los mismos formatos que los reportes cuantitativos. Por esa razón, se acude a la matriz y a la ponderación de las variables como método de evaluación en esta última fase.

4. IDENTIFICACIÓN DE CIUDADES A NIVEL MUNDIAL CON SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)

En este capítulo se establece la selección de las ciudades que se encuentran dentro y fuera de la zona de confluencia intertropical y que a su vez cuentan con sistemas urbanos de drenaje Sostenible. Se toman en cuenta dos criterios: el primero de ellos es la localización respecto a la Zona de Confluencia Intertropical que según Benavides y Poveda (2010), es un fenómeno que tiene lugar en la zona tropical del globo, en la cual se encuentran vientos del noreste y del sureste denominados alisios. Dicho encuentro causa una convergencia cerca del ecuador que da origen a la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT). En esta zona, por efecto de esta misma convergencia y por el calentamiento diurno, las masas de aire ascienden hasta elevadas altitudes y en ocasiones pueden llegar a alcanzar el tope superior de la troposfera. Durante este ascenso se origina la condensación por enfriamiento y por consiguiente la formación de nubes de gran desarrollo vertical, que producen abundantes lluvias y eventualmente tormentas eléctricas y granizo. En la alta troposfera ese aire se aleja del ecuador bajo la forma de una corriente de retomo. En el hemisferio Norte, la dirección de esa corriente se orienta progresivamente hacia el sur oriente; en el hemisferio Sur se orienta al nororiente. Estos vientos de retorno se denominan Contralisios (Benavides Ballesteros & Ayala Poveda, 2010). Lo anterior en conjunto genera condiciones de precipitación diferentes a las que se presentan en otras partes de la tierra.

En la Figura 2 se observa que lo correspondiente a la ZCIT es lo que abarca la franja rosada, que bajo su influencia tiene cerca de 70 países alrededor del mundo. Todos ellos con condiciones climáticas similares, especialmente su régimen de precipitación de tipo bimodal. Este es un parámetro clave en este estudio, ya que es a partir de la precipitación que se

evaluarán los demás parámetros técnicos como son el diseño, la ejecución y puesta en marcha, tanto para las ciudades que se encuentran bajo la influencia de la ZCIT como los que no, pero que aun así han implementado alguna tipología SUDS.

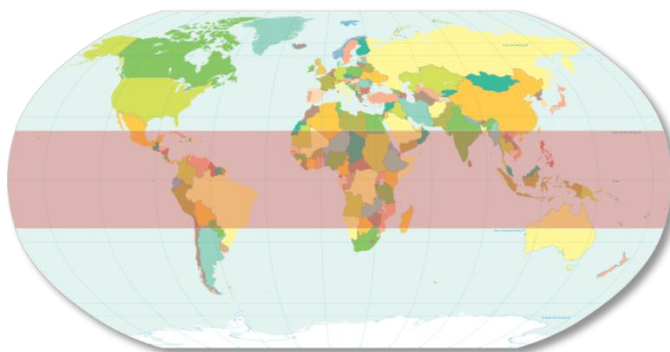


Figura 2. Zona de Confluencia Intertropical. Fuente: (Wikimedia Commons, 2007)

Para llegar a seleccionar las ciudades dentro y fuera de la ZCIT, lo primero que se hizo fue realizar un listado de todos los países que se encuentran bajo la influencia climatológica de la ZCIT. Para cada país se realizó la búsqueda en bases de datos, artículos científicos, publicaciones, tesis y otros documentos de interés con el propósito de investigar si existían ciudades dentro de esos países con casos de SUDS o BMP's. Posteriormente, se realizó el mismo procedimiento para los países fuera de esta zona, obteniendo más casos implementados en ciudades que no se encuentran bajo la influencia de la Zona de Confluencia Intertropical.

En la Tabla 1 se observa los países con las respectivas ciudades dentro de la ZCIT.

Tabla 1. Países y ciudades seleccionados al interior de la ZCIT.

PAÍS	CIUDADES CON SUDS
Brasil	Belo Horizonte
Australia	Melbourne
	Sidney
Colombia	Bogotá

Estas ciudades aunque no han implementado sistemas de captación y/o aprovechamiento de aguas lluvias a nivel ciudad, han implementado sistemas urbanos de drenaje que proporcionan información importante a la investigación.

A continuación se describen los principales avances frente a los SUDS en las ciudades seleccionadas bajo la influencia de la ZCIT que corresponden a Belo Horizonte, Melbourne, Sidney y algunos avances a nivel nacional. Estas ciudades han implementado algún sistema de captación y drenaje de aguas lluvias con fines de aprovechamiento o mitigación de desastres.

Belo Horizonte (Brasil):

Iniciamos este recorrido internacional con la ciudad de Belo Horizonte en Brasil. Durante el Tercer Encuentro Científico SWITCH realizado en el 2008, se realizó la publicación de un artículo de la Universidad Federal de Minas Gerais, localizada en Belo Horizonte Brasil. En el documento se realiza una descripción de los experimentos llevados a cabo frente a Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en esta ciudad. Los autores manifiestan que a esa fecha, Belo horizonte estaba experimentando importantes progresos en materia de administración de las aguas urbanas, de cuyo proceso destacaron la conformación del Consejo Municipal para el Saneamiento Ambiental *COMUSA*. Esta entidad tiene a cargo la política municipal y la potestad de decisión frente a las inversiones que se realizan para la gestión del agua, entre otras responsabilidades.

Se habla de un proceso de planeación, que se divide en dos ramas principales: el saneamiento y la gestión integral de aguas pluviales, que comenzó durante la década de 1990 y que hasta la fecha, ha contribuido a un cambio significativo referente a la manera de abordar las aguas lluvias (Nascimiento, et al., 2008). Según los autores, se requiere importantes adelantos en cuanto a la adaptación de los sistemas urbanos de drenaje convencionales ya existentes.

Situaciones como el arrastre de sólidos y sedimentos a las redes de alcantarillado y la insuficiencia para amortiguar eventos fuertes de precipitación dificultan hasta cierto punto la implementación de estos sistemas.

Respecto a la implementación de sistemas físicos o de mitigación correctiva, se realizaron cuatro experimentos con tipología de zanjas de retención e infiltración dentro de la UFMG (Universidad Federal de Minas Gerais), cuyo montaje se observa en las siguientes imágenes:



Figura 3. Zanja de Infiltración, Zanja de retención y Depósito de sedimentos y escombros.
Fuente: (Nascimiento, von Sperling, Vieira, Silva, Seidl, & de Castro Vieira, 2008)

Dichos experimentos fueron positivos, y como desventajas identificadas se tuvo principalmente los procesos de colmatación de los medios filtrantes, surgiendo así la necesidad de revisar los diseños para extender los tiempos útiles de los SUDS analizados.

Actualmente existe un ejemplo de implementación a escala real de SUD que consiste en un estanque de amortiguamiento de inundaciones dentro de un parque ubicado en Belo Horizonte en Brasil. Su diseño y construcción siguieron los patrones establecidos para esta tipología, adaptados a las condiciones locales de Belo Horizonte.(NILSA, 2010)



Figura 4. Estanque de atenuación de Inundaciones en Belo Horizonte, Brasil. Fuente: (NILSA, 2010).

En los últimos años, un grupo de ONGs están trabajando para que se pueda aprovechar el agua de lluvia de forma más amplia y para conseguirlo, unieron sus esfuerzos con el gobierno e iniciaron un proyecto que tiene estipulada la construcción de un millón de cisternas para almacenar el escurrimiento pluvial en un período de cinco años, con el cual se busca beneficiar a 5 millones de personas. La mayoría de estos tanques están hechos de placas de hormigón prefabricado o de concreto con malla de alambre (Soluciones Hidropluviales, 2013; TUCCI, 2007).

Australia: Casos Melbourne y Sídney.

En el 2010, tuvo lugar la *Jornada de Drenaje Sostenible* llevada a cabo en Pamplona España. Sara Momparler, reconocida a nivel internacional por sus avances y contribuciones en el estudio del diseño e implementación de SUDS, realizó una revisión internacional acerca de los casos prácticos que han tenido lugar en diferentes lugares del mundo y para el caso de Australia, se habló de los adelantos en cuanto a medidas no estructurales o preventivas como sigue a continuación:

Entre la década de los 60 y el año de 1989, tiene lugar la primera fase denominada “Germen para el cambio”, en donde observa con mayor interés las problemáticas asociadas a la gestión de aguas en la ciudad, relacionado con los impactos de la urbanización. En el siguiente periodo

comprendido entre 1990 y 1995, se desarrolló la segunda fase denominada “Construyendo conocimiento y relaciones”, que se caracterizó por el comienzo de la revisión de alternativas a los sistemas y herramientas existentes en cuanto a la planificación urbana en general. Para la tercera fase que se extendió desde el año 1996 a 1999 y que fue denominado “Creación de un grupo de expertos – abanderados”, se llevó a cabo la conformación de grupos de expertos para la evaluación de metodologías y estudios preliminares. Finalmente, se habla de una cuarta fase que tuvo lugar entre el año 2000 y el 2006, en el cual se logró la estabilización del grupo de expertos y abanderados del propósito de revisión de la gestión actual de aguas lluvias.

En cuanto a medidas correctivas, Melbourne cuenta actualmente con la implementación de jardines de tormenta en Bellair Street y Sidney con sistemas de Bioretención en Victoria Park(LANDCOM, 2009).

De todo lo anterior se han obtenido avances significativos como el hecho de hacer obligatoria la implementación de SUDS en nuevos proyectos de desarrollo urbano en Australia, así como el carácter opcional de la implementación de estas tipologías en espacios físicos de desarrollo industrial, comercial y en proyectos de reforma de espacios urbanos ya consolidados(NILSA, 2010, pág. 235).

Colombia: Adelantos locales y avances en Bogotá D.C.

Existen registros de estudios realizados por parte de diferentes entes en los que se aborda desde la problemática local de las escorrentías urbanas y el aprovechamiento de aguas lluvias, hasta pequeñas pruebas realizadas por la academia. De dichos estudios realizados, a nivel nacional se destacan los llevados a cabo por el Colegio Mayor de Antioquia, la Universidad del Norte de Barranquilla, la Universidad del Valle y la Universidad Católica Popular de Risaralda.

Para Bogotá, existen registros de investigaciones y adelantos en el tema como es el caso de los avances desarrollados por la Universidad Nacional de Colombia, la Pontificia Universidad Javeriana y la Universidad de los Andes.

A nivel nacional:

Como parte de las investigaciones realizadas en Colombia, en el 2011 la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia realizó una evaluación económica de la captación de agua lluvia como fuente alternativa de recurso hídrico. Para ello, realizaron la recopilación de información histórica frente a consumos y demanda de agua dentro de la Institución, identificaron posibles fuentes alternativas de recurso hídrico y para establecer la alternativa definitiva, se calculó la cantidad potencial de agua lluvia que podría ser captada en la edificación para su posterior almacenamiento y uso. Paralelamente, el grupo de investigación realizó análisis y proyección económica de la implementación de la alternativa seleccionada para finalmente determinar la sostenibilidad socio-ambiental de la implementación del proyecto. Tras los análisis realizados, decidieron aprovechar las cubiertas o techos de la Institución Universitaria para construir el piloto (Arroyave Rojas, Díaz Vélez, Vergara, & David Macías, 2011).

Para el año 2012, el PhD Humberto Ávila docente de la Universidad del Norte de Barranquilla, realizó su participación en el foro “Hidrología de Extremos y Cambio Climático” llevado a cabo en la Universidad de los Andes el 28 de junio de 2012. Dado el importante aporte, la Universidad de los Andes realizó la publicación de la ponencia de Ávila en la versión #36 de la Revista de Ingeniería de la misma institución. Su ponencia llevó por nombre “*Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático-caso de estudio: ciudad de Barranquilla*”. Ávila afirma que Barranquilla cuenta con una de las problemáticas de drenaje pluvial más críticas del mundo. Los más de 100 km construidos de infraestructura vial han

impermeabilizado el suelo a tal punto que en época de invierno, se convierten en verdaderos ríos, con caudales que según el autor, oscilan entre los 30 y 100 m³/s. Su investigación fue enfocada en un diagnóstico general de los problemas de inundaciones y mediante una discusión de sus hallazgos, abordó alternativas de manejo sostenible de drenaje urbano susceptibles de aplicación a las condiciones locales de la ciudad de Barranquilla para el control de los caudales pico como la posibilidad de usar jardines y zonas verdes con algunas adaptaciones para el amortiguamiento en eventos de precipitación.

Con todo lo anterior, Ávila plantea que la solución se encuentra en el hecho de tomar el drenaje pluvial como servicio público y afirma que *“El drenaje pluvial en Barranquilla debe ser concebido como un servicio público con una función integral que contemple el manejo de cuencas,....Esto implica que debe consolidarse institucionalmente un organismo que opere, administre y mantenga el sistema de drenaje pluvial en la ciudad”*(Ávila, 2012).

En el 2010, Faber Montaña Duque de la Universidad del Valle mediante su trabajo de grado “Selección de Tecnología para la recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales en Áreas urbanas” desarrolló un modelo conceptual para la selección de tecnologías destinadas a recolectar y transportar aguas lluvias y residuales en ambientes urbanos. Dicho modelo contempla cinco SUDS diferentes, el drenaje superficial, alcantarillado pluvial, alcantarillado combinado, alcantarillado sin arrastre de sólidos, alcantarillado simplificado y el alcantarillado sanitario convencional. De dicho estudio el autor obtuvo como resultado que la mejor opción es implementar un par de depósitos de detención junto con un sistema de alcantarillado combinado (Montaña Duque, 2010).

Finalizando con los avances a nivel nacional, en el 2010 fue realizado un trabajo de grado en la Universidad Católica Popular de Risaralda, cuyo propósito fue el de crear un sistema de filtración para aguas lluvias, que pudiera instalarse en viviendas cuyos recursos económicos y

acceso al agua potable fueran difíciles. De dicha investigación, se obtuvo dos prototipos: uno de filtración en las cocinas y otro para los patios de ropas (Sánchez Castaño, 2010).

En Bogotá D.C

En cuanto a los aportes de la academia para la ciudad de Bogotá, la Universidad Nacional de Colombia mediante la Unidad de Hidráulica y el Grupo de Investigaciones de Recursos Hídricos GIREH, ha realizado estudios encaminados a suplir el abastecimiento de agua en algunas zonas mediante el aprovechamiento de aguas lluvias y la integración de sistemas existentes con el propósito de hacerlos más eficientes en conjunto y responder a las necesidades actuales. Existe un artículo publicado por ellos en donde realizan un recorrido histórico a las metodologías de captación de aguas lluvias desde la antigüedad, hasta llegar al siglo XXI, en donde resaltan la presión que ejerce el crecimiento de la población al recurso agua. Se menciona también en este documento el potencial hídrico de Colombia y la facilidad de acceder al recurso, situaciones que han apartado la necesidad de crear y evaluar alternativas que promuevan el uso racional e integral del agua, en el que se promueva la captación y el aprovechamiento del agua de lluvia. Los autores citan algunos casos prácticos en el país para el año 2006, de los cuales y para ese entonces, dos tenían lugar en Bogotá: el primero de ellos fue implementado en el almacén Alkosto Venecia, el cual aprovecha cerca de 6.000 m² de cubierta para captar aproximadamente 4.820 m³ de agua lluvia al año. Dicha tipología fue diseñada para satisfacer al menos el 75% de la demanda de agua potable en el establecimiento comercial y el segundo caso, hace referencia al edificio de Posgrados de Ciencias Humanas de la sede de la Universidad Nacional, el cual cuenta con un sistema de cubierta con grava mediante el cual se capta agua lluvia que a su vez, es almacenada en tanques subterráneos y conducida mediante bombeo para usos varios como inodoros, espejos de agua y otras fuentes. (Ballén Suárez, Galarza García, & Ortiz Mosquera, 2006).

Otro aporte realizado por la Universidad Nacional de Colombia, consiste en el Desarrollo e implementación de un modelo integrado del Sistema de Alcantarillado, Plantas de Tratamiento

de Aguas Residuales PTAR, Humedales y Ríos Urbanos de la ciudad de Bogotá, realizado en conjunto por el Grupo GIREH y el Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Según afirman los autores, este modelo es capaz de representar la situación actual del sistema de drenaje de la ciudad. Se trata de un modelo que podría ser bastante útil en términos de planeación, ya que mediante el mismo sería posible evaluar alternativas de ampliación de infraestructura antes de materializar las obras. Adicionalmente se trata de un modelo que podría ser de suma utilidad en el diseño e implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para la ciudad de Bogotá (González & Camacho, 2013).

Por su parte, la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá (PUJB) ha realizado su aporte frente a la temática de aprovechamiento de aguas lluvias mediante estudios y análisis de viabilidad para dicho aprovechamiento dentro del Campus universitario. En el 2007, Borrero y otros presentaron un análisis de viabilidad técnica y económica del aprovechamiento de agua lluvia como alternativa para riego y lavado de zonas duras y fachadas en el campus de la PUJB. Para dicho análisis se tuvieron en cuenta factores como la oferta hídrica calculada para aguas lluvias, puntos de recolección mediante tanques de tormenta ubicados en sitios estratégicos, análisis de calidad de agua lluvia recolectada y el cálculo de los costos de la infraestructura necesaria para implementar dicha alternativa, concluyendo que dicha alternativa de abastecimiento de agua potable era técnica y económicamente viable (Lara Borrero, et al., 2007). Otro aporte fue realizado mediante el Grupo de investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente, que realizó otro análisis de viabilidad técnica y económica del aprovechamiento del agua lluvia dentro del campus pero esta vez para diferentes usos, teniendo en cuenta el potencial hídrico de aguas provenientes de precipitación dentro del área que comprende el campus universitario, correspondiente a 18 hectáreas de terreno y cerca de 200.000 m² de construcción. Con dicho análisis se logró establecer tanto la oferta-demanda del recurso en el campus como la calidad del mismo y el costo preliminar de la implementación de

infraestructura, teniendo en cuenta que el sistema esta propuesto para suplir usos no potables correspondientes al 14% del consumo total dentro de la Universidad. El sistema de captación de aguas lluvias analizado fue como en el estudio anterior, la ubicación de tanques de almacenamiento y la adecuación de redes aductoras a dichos tanques (Torres, et al., 2012).

La Universidad de Los Andes en el 2001, mediante el departamento de Ingeniería Civil y Ambiental realizó un esquema general de un modelo de estimación de costos en un sistema de saneamiento básico que fue utilizado para identificar las variables más sensibles dentro del sistema y simultáneamente, detectar parámetros prioritarios a optimizar. Este esquema fue aplicado para la ciudad de Bogotá y durante el análisis, los autores identificaron variables de alta sensibilidad como el consumo, el crecimiento de la población y el sistema de alcantarillado adoptado, lo cual aporta elementos de juicio que facilitan la toma de decisiones sobre la implementación de políticas de saneamiento básico y un mejor desarrollo de la planeación de la ciudad dentro del marco del desarrollo sostenible. Para realizar este esquema, el grupo de investigación tomó como referencia un trabajo de grado realizado por Bibiana Pedraza en 1999, en donde en términos generales, el modelo involucra los siguientes procesos tomados como componentes dentro del ciclo del agua:



Figura 5. Componentes dentro del Sistema.
Fuente: Pedraza, 1999 (como se cita en Rodríguez Mateus et al., 2001)

Cada uno de los anteriores componentes se analiza como sistemas con entradas y salidas como se observa en la Figura 6.

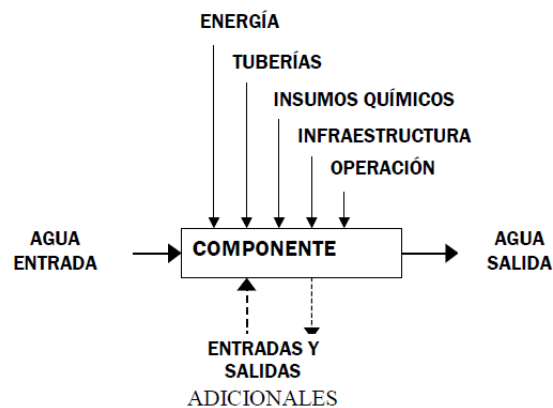


Figura 6. Entradas y Salidas por componentes.
Fuente: Pedraza, 1999 (como se cita en Rodríguez Mateus et al., 2001)

Este modelo puede resultar especialmente útil para la selección de las tipologías de SUDS que serían implementadas definitivamente en la ciudad de Bogotá, ya que aunque las entradas y salidas de los componentes (que para el caso nuestro serían las tipologías y no poseen las mismas unidades para hacer cálculos entre sí), se puede estandarizar cada entrada y salida a

nivel de costos, haciendo la evaluación desde el punto de vista económico. Esto por supuesto aplicaría para fases posteriores a esta investigación, y podría constituirse en una de las alternativas metodológicas para establecer cuál de las tipologías SUDS es más viable económicamente hablando(Rodríguez Mateus & Díaz-Granados Ortiz, 2001).

Luego de la revisión de los adelantos frente al tema de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, se observa que si bien existen acercamientos frente al tema, identificación de la problemática y planteamiento de posibles soluciones, es claro que una investigación en la que se analice la viabilidad de la implementación de algunas de las tipologías SUDS para toda la ciudad de Bogotá D.C., hasta el momento no se encuentra disponible. En este punto finaliza la contextualización de las ciudades SUDS que se encuentran dentro de la ZCIT

Respecto a las ciudades fuera de la ZCIT, se conoce que el territorio que se encuentra fuera de esta zona tiene un comportamiento sustancialmente distinto en cuanto a condiciones climáticas se refiere. Se caracteriza por un régimen de precipitación bajo en comparación con la ZCIT y cuenta con la influencia de las estaciones climáticas de invierno, primavera, verano y otoño.

Vale la pena destacar que los estudios referentes a Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible son predominantes en estos países, y aunque las condiciones bajo las cuales son analizadas estas tipologías son diferentes a las de los países de la ZCIT, representan modelos de referencia en cuanto a implementación, incentivos, diseño y ejecución. Los SUDS y en general los métodos de captación de aguas lluvias con todo lo que concierne frente a legislación y organización territorial surgen sobre todo en estos países dada la escasa disponibilidad del recurso hídrico, que con el tiempo los ha obligado a tomar estrictas medidas frente al desarrollo urbano de las ciudades, el ordenamiento territorial, la sostenibilidad y la sustentabilidad.

A continuación se mencionan los países fuera de la ZCIT con ciudades dentro de su territorio, que cuentan con la implementación de algún sistema de captación o drenaje urbano sostenible.

Se iniciará el recorrido con la ciudad de Vancouver y finalizará con la ciudad de Lyon, en Francia.

Tabla 2. Países y ciudades seleccionados fuera de la ZCIT.

PAÍS	CIUDADES CON SUDS
Canadá	Vancouver
Estados Unidos	Oregon Washington Chicago
Alemania	Berlín
España	Madrid Barcelona
Inglaterra	Londres
Francia	Lyon

Vancouver (Canadá):

En países como Canadá y Estados Unidos, la necesidad de agua es muy poca ya que cuentan con reservas hídricas constantes por deshielo y nieve, así como por las lluvias. Sin embargo, el incremento poblacional y la contaminación de fuentes en zonas urbanas, ha hecho que sea cada vez más evidente la escasez de agua. Por esta razón algunos estados de ambos países están fomentando la captación de agua de lluvia, como un medio para ahorrar agua, evitar contaminación y prevenir posibles inundaciones (Soluciones Hidropluviales, 2013).

Para el caso de Canadá, se habla de una importante evolución en todo lo referente a la gestión de aguas pluviales. La historia se divide en dos: antes y después de 1990. Antes de la década de los 90, el principal objetivo fue simplemente controlar la cantidad de las escorrentías causadas por el agua lluvia. Esto llevó a la creación de sistemas muy generales, que consistieron en la instalación de sistemas de drenaje por tuberías, diseñadas para evacuar la escorrentía a cuerpos de agua cercanos lo más rápido posible. (Water Canada, 2009).

A principios de 1990, se amplía la perspectiva de gestión para incluir dos objetivos ambientales: calidad de agua y control de la erosión. Al abordarlo de esta manera, las primeras soluciones surgen y la primera de ellas fue la ubicación de estanques de recolección.

Actualmente, las metas de gestión se han ido alcanzando mediante una serie de medidas de origen y control de transporte que simulan y se asemejan cada vez más a las condiciones previas al desarrollo. Dentro de dichas medidas se encuentran en Canadá técnicas como:

- ✓ Disminución de la velocidad de salida del agua almacenada.
- ✓ Procesos de Infiltración para la recarga de aguas subterráneas.
- ✓ Filtración para mejorar la calidad del agua.
- ✓ Fitorremediación para eliminar los contaminantes mediante procesos biológicos de las plantas.

Las anteriores medidas según la fuente, hacen parte de estrategias de mitigación en origen y en nada generan conflictos con los sistemas tradicionales que al fin y al cabo, siguen haciendo parte de los mecanismos dentro de la planificación de aguas lluvias. Más bien estas medidas sobresalen porque su importancia radica en minimizar y tratar la escorrentía antes de que llegue a las tuberías (Water Canada, 2009).

En Vancouver, complementan las medidas estructurales con el otorgamiento de un subsidio para la compra de bidones o contenedores para el aprovechamiento del agua lluvia, como parte de un programa piloto para la conservación del agua. Se trata de tanques plásticos de 75 galones (284 litros) que se entregan por U\$ 40 incluidos los impuestos y cuya función es la de recolectar agua lluvia proveniente de los techos. El agua recolectada es utilizada para regar los jardines y el césped, actividades que demandan más del 40% del agua total que llega a las viviendas durante el verano. Las proyecciones indican que cada barril podría ahorrar cerca de

13.000 galones (4.920 litros) de agua durante los meses de verano donde la demanda de agua es más alta.

Otro de los métodos utilizados para el aprovechamiento de aguas lluvias usados también en ciudades como Toronto, consiste en recolectar el agua de lluvia y tratarla para consumo humano. En ese orden, se suministra mediante un sistema de canales que conducen el agua lluvia hacia un tanque de almacenamiento donde se le adiciona cal, con el objetivo de reducir la acidez del agua y darle un sabor fresco, posteriormente el agua pasa a través de un filtro de arena fina y carbón activado para remover todas las impurezas y por último es sometida a un proceso de desinfección mediante luz ultravioleta (Ballén Suárez et al., 2006).

Estados Unidos: Casos Oregon, Washington y Chicago.

Según la contextualización histórica de los SUDS realizada por la Universidad de Cantabria expuesta durante la Jornada de Drenaje realizada en España en el año 2010, Estados Unidos comenzó la utilización de firmes permeables a comienzos de la década de 1970, en donde el objetivo principal de estos sistemas fue el de aliviar de cierta forma la contaminación a causa de vertimientos de aguas lluvias a los sistemas convencionales de saneamiento, llevando a reducir los parámetros de diseño de las usuales infraestructuras de drenaje urbano (NILSA, 2010).

En Oregon, los sistemas de captación de aguas lluvias implementados en las 45.000 viviendas en Portland permiten que se infiltren 4 millones de metros cúbicos de agua por año, evitando así que éstos contribuyan al pico de escorrentía o al caudal de agua que requiere tratamiento. Sistemas como los adoquines permeables y los bordillos verdes con franjas de infiltración han eliminado prácticamente la escorrentía de lluvia de las calles. (NILSA, 2010)

Un evento recurrente se presentaba en la subcuenca de Brooklyn Creek. Los aumentos de picos de escorrentía que resultaban de la impermeabilización de la cuenca aumentaron el caudal de los sistemas combinados de alcantarilla y cloaca. Éstos superaban la capacidad de

tratamiento y eran vertidos al medio receptor. Lo anterior sumado a problemáticas ya conocidas en otros lugares del mundo a causa de la impermeabilización del suelo dio lugar a que por medio de iniciativas públicas y privadas, y empleando una variedad de sistemas de drenaje natural, los promotores de estos programas consiguieran ahorros cercanos a los US\$86 millones. Gracias a la reducción en el caudal pico de escorrentía a tratar, quedó reducida la ampliación necesaria de la planta de tratamiento de aguas (Sánchez Pachón, 2010).

En Washington, según la *International Stormwater BMP Database*, se encuentran implementados sistemas de Bioretención, Control, depósitos de Retención, Pavimentos porosos o permeables y pondajes (ASCE et al., 2003).

Para Chicago, ciudad ubicada en el estado de Illinois, se encuentran alrededor de seis tipologías diferentes implementadas como sistemas urbanos de drenaje sostenible (Figura 7): pavimentos permeables, zanjas filtrantes, jardines de tormenta y en otros casos poco frecuentes, pozos y/o zanjas de infiltración (Daley, 2003).



Figura 7. Ejemplo de un jardín de tormenta implementado en Chicago (Illinois). **Fuente: (Daley, 2003; Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007)**

Berlín (Alemania):

Los hallazgos frente a los avances en la ciudad de Berlín son tal vez de los más representativos en esta investigación, ya que como Melbourne y Sidney en Australia, han dado

importantes pasos tanto en las medidas preventivas como en las medidas estructurales. Es así como hacia el año de 1998, los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia tipo SUDS incursionaron en Berlín como parte de un importante proceso de re-desarrollo urbano a gran escala que tenía entre otros propósitos controlar las inundaciones, utilizar racionalmente el agua de la ciudad y simultáneamente crear un mejor micro clima que de alguna forma simulara las condiciones previas a la urbanización. Para ello, implementaron una metodología que consistió en lograr que el agua lluvia fuera captada a través de las cubiertas o fachadas de 19 edificios cuya área aproximada es de 32.000 m^2 , y posteriormente fuera recogida y almacenada en un tanque subterráneo de capacidad de 3.500 m^3 . Este volumen almacenado es usado para la descarga de inodoros, el riego de zonas verdes e incluso, el mantenimiento de las ecofachadas.(Ballén Suárez, Galarza García, & Ortiz Mosquera, 2006)

Otro caso en Berlín es el desarrollado en *Belss-Luedecke-Strasse Building State*, que consiste en la captación del agua lluvia mediante la totalidad de las cubiertas en un área aproximada de 7.000 m^2 . El agua captada es conducida a una cisterna con capacidad de 160 m^3 , y se mezcla junto con el agua de escurrimiento de las calles, provenientes de parqueaderos y vías peatonales, en un área aproximada de 4.200 m^2 . Si bien las características del agua lluvia luego de someterse a tratamiento no cumplen con la calidad de agua para consumo humano, puede ser usada en la descarga de sanitarios y el riego de zonas verdes. Este sistema está diseñado para que gran parte de los contaminantes del flujo inicial sean evacuados al alcantarillado de aguas lluvias. Según el artículo, el sistema tiene capacidad de retener aproximadamente el 58% del agua lluvia que cae dentro del perímetro de las instalaciones y mediante un modelo basado en 10 años de simulación, los autores lograron establecer que el ahorro de agua potable con la utilización de agua lluvia es de 2.430 m^3 por año, volumen que puede preservar el equivalente al reservorio de agua subterránea de Berlín (Ballén Suárez et al., 2006).

Por otra parte, la gestión Integral de aguas de escorrentía o “*Stormwater management*” ha sido objeto de interés en Alemania, dado el alcance que tiene para evitar y aprovechar la escorrentía superficial en periodos de tormenta. No en vano ha sido considerado como líder en la investigación y uso de techos verdes, ecofachadas o “*Green roofs*”. Sin embargo, aunque el fundamento de la implementación de estos sistemas ha sido reducir los niveles de escorrentías superficiales y con ello todas las problemáticas que implica, en Alemania se han evaluado simultáneamente técnicas de remediación, que son útiles al momento de reducir los problemas asociados a escorrentías (Sommer, 2008). Dichos sistemas son efectivos mejorando tanto la cantidad como la calidad de la escorrentía superficial. Para su análisis, abordan al igual que países como España los métodos preventivos y correctivos para la gestión de inundaciones.

Ahora bien, en cuanto a los sistemas de mitigación de escorrentía o métodos correctivos se han evaluado los sistemas convencionales, ampliamente reconocidos e implementados a nivel mundial, siendo su principal objetivo la evacuación de aguas lluvias y catalogados como una de las técnicas más antiguas de gestión de aguas lluvias y simultáneamente se han realizado estudios de otros sistemas, como es el caso de los sistemas de filtración de aguas lluvias (clasificadas en filtración superficial y subsuperficial) que si bien pueden variar según el sitio, todos los sistemas de filtración son diseñados para mejorar la calidad del agua, en este caso de la escorrentía mediante la remoción de contaminantes. Los sistemas superficiales son menos costosos y de más fácil construcción e implementación. Usando principalmente como medio filtrante estratos de arena, estos sistemas son capaces de filtrar el agua lluvia y la escorrentía superficial antes de que se infiltre o sea conducida a cuerpos de agua superficiales de origen natural. Aún y con todas las ventajas de implementación de los sistemas de filtración, existe una desventaja y es, que en eventos de tormenta considerables, el sistema no alcanza a filtrar todo el volumen de agua que ingresa, razón por la que mediante una cámara de alivio, el agua se libera mediante rebose. Por eso, es usual encontrar estos sistemas cerca de ríos y lagos a fin de recibir el volumen de exceso.

Otras importantes alternativas consideradas en Alemania se refieren por ejemplo, al uso de sumideros filtrantes que pueden ser combinados con los sistemas convencionales de evacuación de aguas lluvias, las zanjas filtrantes, humedales y pondajes (Sommer, 2008).

En cuanto a los métodos preventivos dentro de la gestión de escorrentía de aguas pluviales se han evaluado métodos como el Desarrollo de Bajo Impacto (*Low Impact Development LID*), integrando estrategias como espacios verdes y una serie de objetivos encaminados a que en lugar de canalizar la escorrentía de las aguas pluviales a través de una serie de tuberías, se produzca la infiltración y la evaporación del agua de lluvia de manera natural después de que termine una tormenta, y el uso de técnicas alternativas tales como barriles o depósitos de aguas lluvias (Sommer, 2008).

Los métodos preventivos son más recientes que los sistemas de mitigación, y van enfocados a tener en cuenta los espacios verdes, respetarlos y conservarlos durante el proceso de urbanización, alrededor de un desarrollo sostenible y de bajo impacto. Por esa razón cuentan con un fuerte fundamento legal en los países que en la actualidad, ven en estos una herramienta de gestión usualmente más económica y organizada que los mismos métodos correctivos. Adicionalmente, si se requiere de un mínimo mantenimiento, no es necesario interrumpir los sistemas de evacuación instalados en la ciudad.

Una situación de especial interés que aporta Alemania con los estudios realizados, es la incorporación de “*Green gardens*”, Estacionamientos y superficies viables permeables dentro del marco del desarrollo de bajo impacto, teniendo en cuenta que son estrategias diseñadas desde la planeación misma de los centros urbanos, y en el eventual caso que no haya sido tenido en cuenta porque son terrenos urbanizados desde hace años, se trata de tipologías de fácil implementación, pues solo requieren espacios libres donde se puedan adaptar, como parques y otras zonas verdes que estén disponibles.

De manera un poco más detallada y según el artículo *Stormwater Management in Germany*, “*Los jardines de lluvia puede aumentar significativamente la eficiencia hidrológica de las áreas que están muy urbanizadas. La escorrentía puede ser recogida por los jardines de lluvia en zonas cercanas a los edificios antiguos, estacionamientos u otras zonas con una alta proporción de cobertura impermeable*”. Este sistema de bioretención utiliza la vegetación y el suelo para filtrar el agua lluvia antes que ésta regrese al ciclo hidrológico. Generalmente este sistema también es óptimo para la recarga de acuíferos, dado que mientras tiene lugar el evento de precipitación, el agua se deposita en estas zonas, mientras se infiltra es liberada de contaminantes hasta que finalmente llega a depósitos de agua subterránea. En el proceso, una parte del agua que cae es susceptible de evaporación, por lo que estas condiciones recrean de una manera natural el ciclo hidrológico aún en zonas con alta urbanización (Sommer, 2008).

Un proceso similar ocurre en zonas de estacionamiento de vehículos, en donde no necesariamente utilizan cobertura vegetal para facilitar la infiltración del agua lluvia. Usualmente, se han implementado estos sistemas con cubrimiento de pavimento poroso o permeable.

Finalmente después de hacer una revisión de lo que Alemania ha adelantado frente a la evaluación de Sistemas Urbanos de drenaje Sostenible y/o gestión de aguas lluvias, se hablará de su experiencia frente a la implementación de algunos de estos sistemas.

Si bien Alemania es reconocido a nivel mundial por ser líder en el diseño e implementación de los techos verdes que hacen parte de las denominadas ecofachadas o “*Green roofs*”, no es el único SUD con el que cuenta en la actualidad. Se han implementado otras tipologías en Berlín como por ejemplo, pavimentos permeables y zonas verdes capaces de retener el agua y facilitar los procesos de evapotranspiración propios del ciclo natural del agua en entornos urbanos (Madison’s Urban and Regional Planning Department, 2010).

España: Casos de Madrid y Barcelona

Como se mencionaba en la contextualización de este capítulo, los casos más representativos de SUDS o BMP’s han sido desarrollados en ciudades que no se encuentran bajo la influencia

de la ZCIT y España no es la excepción. Es uno de los países con más adelantos respecto a las tipologías SUDS en el mundo, y de hecho, ya cuenta con empresas especializadas en el diseño y construcción de estos sistemas, dado el constante fortalecimiento del compromiso en todo lo referente a la gestión del agua. Se seleccionó para el caso español las ciudades de Madrid y Barcelona de las cuales se van a revisar sus avances a continuación. Según Sánchez, la ciudad de Madrid ha invertido cerca de US\$700 millones en la construcción de depósitos de captación de aguas lluvias para eventos de precipitación con retornos de 10-50 años. Teniendo en cuenta los elevados costos y la complejidad de dichos proyectos que suponen serias desventajas frente a la adopción de estos sistemas, se están fomentando alternativas que adicional al tratamiento del agua, controlen en lo posible caudales de escorrentía en su origen (Sánchez Pachón, 2010).

En el contexto histórico, en el 2007 este tipo de tecnologías no eran ampliamente reconocidas en España y su implementación aún no se encontraba consolidada. Sin embargo, esto no fue una limitante para que los organismos competentes en España mantuvieran su interés y siguieran investigando acerca de estas metodologías. Hasta ese momento, la tipología más implementada en este país fue el denominado depósito de laminación o retención, de manera que Barcelona y Madrid realizaron esfuerzos importantes frente a la investigación de los SUDS, en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Norte. Solo para hacerse a una idea, según Momparler y Doménech en el 2007 existían en servicio tan solo 10 depósitos en Barcelona, destinados a controlar inundaciones y con un volumen útil total de 400.000 m³. Adicionalmente existieron cerca de 31 depósitos planificados en la ciudad y su área metropolitana, con un volumen adicional de 1.150.000 m³.

Simultáneamente en Madrid, tuvo lugar el desarrollo del Plan de Mejora de la Calidad de las Aguas del Río Manzanares, cuyo principal objetivo fue el de lograr un buen estado ecológico de

la cuenca mediante el desarrollo y construcción de tanques de tormenta que aseguraron la calidad de agua en el tramo urbano del río. Hasta ese momento, solo se habían planificado 27 depósitos con un volumen total de 1.300.000 m³, dentro de los cuales se encuentran los depósitos de Arroyofresno y Butarque, cada uno con 400.000 m³ de capacidad. (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007)



Figura 8. Zona de parqueo permeable en Gijón y pavimento permeable en San Sebastián.
Fuente: (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007).

Pero con relación a dichas tipologías, se sabe que otras metodologías SUDS fueron implementadas de manera un poco mas escasa, como es el caso de los pavimentos permeables que en algunos casos, fueron combinados con depositos de laminación, destinados para la reutilización en actividades como el riego. (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007)

Continuando con el desarrollo histórico de estos sistemas en España, en el año 2010, la Universidad de Cantabria abordó algunos sistemas denominados “firmes permeables”, que se definen como “el diseño y construcción de secciones compuestas por varias capas de materiales de construcción que permiten el paso del agua a través de las mismas y en

conjunto, ofrecen la capacidad portante necesaria para resistir un tráfico determinado”. A este subgrupo de SUDS hacen parte los ya reconocidos pavimentos permeables. Estos se componen de dos grandes capas: pavimento permeable y capas inferiores. La primera se compone generalmente de Césped o grava con refuerzos, adoquines con ranuras, mezcla bituminosa porosa y hormigón poroso. Las capas inferiores usualmente son capas granulares, geosintéticos y estructuras de plástico. (NILSA, 2010)

Se hace mención de estos sistemas ya que según la definición y clasificación dada por la Universidad de Cantabria es posible su implementación como Sistema Urbano de Drenaje Sostenible mediante la aplicación en sitios públicos como: parqueaderos de vehículos ligeros, vías con baja intensidad de tráfico, zonas y senderos peatonales, áreas de nuevo desarrollo urbano, parqueaderos aislados que no cuentan con alguna red de saneamiento para conectarse, como es el caso de aquellos situados en áreas recreativas o parques naturales y excepcionalmente en zonas de tráfico pesado como áreas de servicio en puertos o aeropuertos. (NILSA, 2010)

Finalmente como casos prácticos en Barcelona, se tiene la Urbanización Torre Baró, la parcela Industrial Villanueva de Gallego en Zaragoza, el Parque de Servicios Municipal Crevillente, Urbanización MR-10 La Marina D’elx, prolongación de La Castellana en Madrid, entre otros destacados. (NILSA, 2010, pág. 262)

Londres (Inglaterra): Inglaterra es uno de los países más antiguos en la adopción, diseño y construcción de tipologías SUDS o mejor conocidos en ese país como Best Management Practices o BMP’s. En el Reino Unido, durante las décadas de 1980 y 1990 se extendió la implementación de firmes permeables con doble propósito: la reducción de la escorrentía

superficial urbana y la mejora de su calidad, dando lugar al concepto de drenaje sostenible dentro de la Agenda 21 local (NILSA, 2010).

Springhill Cohousing Stroud, Gloucestershire en Londres, es uno de los sitios en donde se han implementado tipologías SUDS y Se trata de un sistema que involucra más de una tipología, en el que el agua superficial fluye desde una terraza y va a lo largo de una calle peatonal hasta un emisario donde surge un manantial. En la zona de parqueadero, se llevó a cabo la instalación de pavimento permeable. El agua que allí se recoge, es almacenada en unos tanques subterráneos.

Si bien Inglaterra tiene implementados medidas de mitigación físicas, su fortaleza en cuanto a estos sistemas corresponde a los instrumentos de planeación y políticas en donde la gestión de aguas lluvias hace parte del desarrollo en general (Graham, Day, Bray, & Mackenzie, 2012).

Lyon (Francia): Para el caso francés, se tiene conocimiento de la implementación de estructuras de retención o embalses que comenzaron a utilizarse desde finales de los 70 en Burdeos, en toda su zona urbana y más adelante durante 1980 y 1990 se extendió a otros lugares con miras a mejorar la calidad de agua de escorrentía y su posterior almacenamiento (NILSA, 2010).

Para el caso de Francia, se cuenta con un ejemplo integral de implementación de metodologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y es el caso del proyecto Porte des Alpes en Lyon. Durante la planeación del parque tecnológico ubicado en St. Priest y con disponibilidad de un área total de 200 ha, se adoptaron técnicas SUDS complementarias entre sí para responder a una situación particular que consistía en la falta de un sistema de evacuación natural o drenaje. Por esa razón, se instalaron tipologías combinadas que entre otras cosas involucran cunetas verdes, drenes filtrantes, estanques de retención y depósitos de infiltración que hacen parte final del todo el sistema implementado. El anterior es un modelo de referencia frente a la implementación de SUDS, ya que deja ver que es posible implementar estos sistemas sin

afectar el propósito principal del terreno en donde se instalan dichos sistemas, ya que dichas instalaciones están abiertas al público para actividades de deporte y recreación. En la actualidad, el parque Porte des Alpes recibe visitas permanentes de profesionales involucrados en el estudio de estos sistemas y en el desarrollo de técnicas de sostenibilidad como estas. Tal como se observa en la Figura 9, estas tipologías fueron integradas con el diseño del parque.(Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007)



Figura 9. Cuneta verde, Estanque de retención y campo de fútbol integrado en un depósito en Lyon. Fuente: (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007)

Algo muy importante que mencionan Monparler y Doménech (2007) en este artículo es que aunque en principio pareciera que estos sistemas solo pueden implementarse en zonas de nuevo desarrollo, no debe descartarse la posibilidad de implementarlos en espacios consolidados (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007).

5. EVALUACIÓN DE CONDICIONES TÉCNICAS AMBIENTALES DE CIUDADES SELECCIONADAS VS. CONDICIONES TÉCNICAS AMBIENTALES DE BOGOTÁ D.C

Luego de la selección de las ciudades dentro y fuera de la ZCIT, el siguiente paso es tomar la información obtenida de cada una y evaluarla desde diferentes criterios, como son las tipologías SUDS implementadas, el diseño, la implementación, ejecución e incentivos y establecer la capacidad de adaptabilidad a Bogotá mediante la comparación respecto a sus condiciones locales.

5.1 TIPOLOGÍAS SUDS APLICADAS

Durante el recorrido realizado por las ciudades se pudo observar que las tipologías adoptadas son diversas y se ajustan a las condiciones locales de cada ciudad. Sin embargo, se considera de gran importancia hacer mención no solo de las tipologías implementadas en estas ciudades, sino que además, se hará una breve reseña de cada una de los sistemas más implementados a nivel mundial.

1. Medidas no estructurales:

Tienen como propósito prevenir la contaminación del agua reduciendo al máximo la posibilidad de contaminación de las escorrentías urbanas y simultáneamente, evitar en cierta medida el tránsito de las mismas aguas abajo. Dentro de estas medidas se incluyen también las legislativas, educativas y económicas (ver Tabla 3).

Tabla 3. Medidas no estructurales de SUDS.

Fuente: (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007).

MEDIDAS NO ESTRUCTURALES DE SUDS	
➤	Educación y programas de participación ciudadana para: concienciar la población del problema y sus soluciones, identificar agentes implicados y esfuerzos realizados a la fecha, cambio de hábitos, participación de la población en los programas.
➤	Planificar y diseñar minimizando las superficies impermeables.
➤	Limpieza frecuente de superficies impermeables para reducir la acumulación de contaminantes.
➤	Controlar la aplicación de herbicidas y fungicidas en parques y jardines.
➤	Controlar las zonas en obras para evitar el arrastre de sedimentos.
➤	Asegurar la existencia de procedimientos de actuación y equipamiento adecuado para tratar episodios de vertidos accidentales rápidamente y con técnicas secas en lugar de limpieza con agua.
➤	Limitar el riesgo de que la escorrentía entre en contacto con contaminantes.
➤	Control de conexiones ilegales o erradas al sistema de drenaje.
➤	Captación y aprovechamiento de pluviales.

2. Medidas Estructurales:

En esta categoría se encuentran aquellas estructuras mediante las cuales es posible gestionar las escorrentías urbanas en un plano correctivo, que involucran necesariamente la adecuación de espacios urbanos para la construcción e implementación de una o varias tipologías (ver Tabla 4).


Tabla 4. Medidas estructurales de SUDS.

Fuente: (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007).

MEDIDAS ESTRUCTURALES	
Cubiertas vegetadas (Green-roofs): <ul style="list-style-type: none"> - Conformados por varias capas - Capa final de cobertura vegetal. - Utilizados en tejados, fachadas y terrazas. - Interceptan y retienen aguas pluviales - Ventajas: reducen el volumen de escorrentía y atenúan el caudal pico. Adicionalmente depuran el agua captada y actúan como aislantes térmicos en las edificaciones amortiguando el fenómeno de las “islas de calor” que se produce en entornos altamente urbanizados. 	

<p>Superficies Permeables (Porous/ Permeable Paving):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Permiten el paso de agua lluvia a través de su superficie - El agua lluvia se infiltra y es retenida en capas subsuperficiales para su reuso o evacuación. - Dentro de esta categoría de SUD se pueden encontrar césped o gravas, bloques impermeables con juntas permeables, bloques y baldosas porosas, pavimentos continuos porosos (asfalto, hormigón, resinas, etc). 	
<p>Franjas Filtrantes (Filter Strips):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Son franjas de suelo vegetadas, anchas y con poca pendiente. - Generalmente se localizan entre una superficie dura y un medio receptor de la escorrentía (agua superficial, sistema de tratamiento, infiltración o evacuación). - Su principal ventaja es que promueve la sedimentación de las partículas y contaminantes arrastrados por el agua, así como la infiltración y disminución de la escorrentía. 	
<p>Pozos y Zanjas de Infiltración (Soakaways and Infiltration Trenches):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pozos y zanjas de profundidades de 1 a 3 m. — - Se encuentran rellenos de material drenante que puede ser granular o sintético. - Se conciben como estructuras de infiltración capaces de absorber totalmente la escorrentía generada de acuerdo con el caudal para el cual fueron diseñadas, así que una de sus más grandes ventajas es la eficiencia que manejan. 	
<p>Drenes filtrantes o franceses (Filter Drains):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zanjas poco profundas rellenas de material filtrante (granular o sintético), - Pueden tener o no conducto inferior de transporte, - Es una tipología diseñada para captar y filtrar la escorrentía de superficies impermeables aledañas. - Al captar la escorrentía la transportan y adicionalmente permiten la infiltración y/o laminación de la misma. 	

<p>Cunetas verdes (Swales):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Son Estructuras lineales vegetadas. - Sus parámetros de diseño son base ancha ($>0,5$ m) y talud tendido ($<1V: 3H$) - Han sido creadas para almacenar y transportar superficialmente la escorrentía. - No debe generar velocidades superiores a 1-2 m/s. - Permiten la sedimentación de las partículas para una eliminación eficaz de los contaminantes. Adicionalmente pueden permitir la infiltración a capas inferiores. 	
<p>Depósitos de Infiltración (Infiltration Basins):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Son depresiones del terreno vegetadas. - Han sido diseñadas para almacenar gradualmente la escorrentía generada en superficies contiguas. - Esta estructura promueve la transformación de un flujo superficial en subterráneo, - Simultáneamente favorece la eliminación de contaminantes mediante filtración, adsorción y transformaciones biológicas. 	
<p>Depósitos de Detención (Detention Basins) En superficie:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Son depósitos superficiales diseñados para almacenar temporalmente los volúmenes de escorrentía - Favorecen la sedimentación y en consecuencia la reducción de la contaminación. Pueden emplazarse en “zonas muertas” o ser compaginados con otros usos, como los recreacionales, en parques e instalaciones deportivas. 	
<p>Depósitos de Detención (Detention Basins) Enterrados:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Son sistemas muy prácticos cuando no se dispone de terrenos en superficie. - o en los casos en que las condiciones del entorno no recomiendan una infraestructura a cielo abierto, estos depósitos se construyen en el subsuelo con materiales como hormigón armado y los de materiales plásticos los más habituales. 	
<p>Jardines de Tormenta o Bioinfiltración (Rain Gardens)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Son jardines adaptados con mayor capacidad y retención de aguas lluvias. - Son estructuras que pueden tener diferente forma y brindan libertad de uso de espacio. - Permiten la infiltración natural del agua de lluvia en el suelo amortiguando fuertes eventos de lluvia. - El éxito de esta tipología radica en la infiltración de 	

manera natural. - Aporta al diseño paisajístico del lugar donde es implementado.	
Estanques de Retención (Retention Ponds): - Corresponde a lagunas artificiales, - Su lámina de agua es permanente cuya profundidad oscila entre 1,2 y 2 m. - Su vegetación tipo humedal es acuática, tanto emergente como sumergida. - Están diseñadas para garantizar largos periodos de retención de la esorrentía (2–3 semanas), - Promueven la sedimentación y la absorción de nutrientes por parte de la vegetación. Contienen un volumen de almacenamiento adicional para la laminación de los caudales punta.	

Aunque cada tipología cuenta con sus características propias de diseño y puesta en marcha, llama la atención que si bien cada una posee sus propias ventajas y desventajas, los pavimentos permeables siendo ampliamente investigados e implementados, son tal vez de los sistemas que posiblemente generan mas inquietudes y eso se debe básicamente a las implicaciones técnicas de diseño, pues si bien son reconocidos por su alta eficiencia, demandan mayores costos que otras tipologías y también riesgos físicos. Uno de ellos es la inestabilidad que eventualmente podría surgir en el terreno ya que poseen una característica particular que es la resistencia del material (capa de rodadura) y el sistema al flujo vehicular. Se debe garantizar que la manera como se diseñan y construyen estos sistemas sea la mas apropiada, pues si bien el objetivo es permitir la infiltración de las aguas lluvias captadas, esto debe ir de la mano con la resistencia del pavimento de acuerdo al tránsito que eventualmente circularía por el. A continuación se observa un esquema sobre las opciones de construcción, los sistemas de transporte del agua captada y a nivel general, las capas que componen el sistema.



Figuras 10 y 11 - Conducción de aguas captadas mediante tubería o módulos de drenaje y capas en sistema de pavimentos permeables. Fuente: (ARGOS, 2013)

5.2 CRITERIOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

El auge de los Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible no solo radica en la solución que brindan a la problemática de las escorrentías urbanas sino que además, brinda una serie de ventajas y beneficios en cuanto al diseño, construcción e implementación. Se trata no solo de encontrar alternativas de solución al problema, se busca fundamentalmente que sean viables desde todos los puntos de vista, incluyendo el contexto técnico.

Siendo entonces los aspectos técnicos de diseño y construcción parte del criterio de selección de una tipología SUD a implementar, se hace necesario para el objeto de este trabajo realizar una revisión de los aspectos técnicos y de diseño que han sido tenidos en cuenta para la implementación de estos sistemas en algunos de los países mencionados en capítulos anteriores.

Hasta el momento se han mencionado los múltiples beneficios de las tipologías implementadas, los países que son referencia frente al tema, las tipologías de SUDS que han sido implementadas y ahora, en esta sección, se abordará el tema desde los requerimientos técnicos mínimos de diseño y construcción.

Uno de los puntos técnicos de discusión más fuertes en la implementación de las tipologías SUDS inicialmente fue la diferencia entre los patrones de lluvia en la zona del Mediterráneo y el norte de Europa, cuna y origen del desarrollo de SUDS en el continente. Esta situación hacía

replantear la eficiencia de estos sistemas que, aunque siendo los mismos, no se tenía certeza de su efectividad bajo condiciones y lugares distintos como es el caso de España, que tomó como referencia lo implementado en el norte de Europa. Aun así, con el paso del tiempo se observó que España no solo adaptó las tipologías a sus condiciones locales sino que además, es punto de referencia a nivel mundial en la investigación, diseño y construcción de dichos sistemas.

Adicionalmente, en países como Estados Unidos y Australia, cuyas condiciones climáticas eran un poco más similares a las españolas, se han venido implementando estos sistemas con éxito.

Dado que uno de los propósitos de estos sistemas aparte de mejorar la problemática de escorrentías es reproducir o recuperar en cierta medida la hidrología natural de la cuenca donde se quieren incorporar estas tipologías, Momparler y Dòmenech (2007) establecen una jerarquía de técnicas a considerar en el diseño de la cadena de gestión de aguas urbanas:

1. Prevención: Basada en la aplicación de medidas no estructurales.
2. Control en origen: Control de la escorrentía en la fuente o en sus inmediaciones.
3. Gestión en entorno urbano: Gestión del agua a escala local.
4. Gestión en cuencas: Gestión de la escorrentía a escala regional.

Se habla que la planificación y el diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible es un trabajo multidisciplinar, en el que intervienen ramas como la hidrología, hidráulica, geotecnia, cálculo de estructuras, impacto ambiental, paisajismo, urbanismo, etc. Sin embargo, para el dimensionamiento de las infraestructuras es fundamental y relevante la hidráulica y la hidrología, para dar origen al diseño más apropiado para ser implementado. En ese orden de ideas, la Universidad de Cantabria establece una serie de mínimos en cuanto al diseño que para iniciar, deben involucrar una serie de ítems como la actuación, el entorno, el clima, la topografía, entre otros. Dichos mínimos se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Mínimos de Selección frente al diseño de SUDS. Fuente: (NILSA, 2010)

INFORMACIÓN	FUENTE	DESTINO
Actuación	Documentos de planificación de la correspondiente actuación.	Ajustar la tipología.
Entorno	Estudios de impacto ambiental y características naturales, sociales y económicas.	
Clima	Agencia Estatal de Meteorología y entidades regionales equivalentes.	Diseñar la funcionalidad
Topografía	Instituto Geográfico Nacional y administraciones públicas locales.	
Geotecnia e hidrogeología	Instituto Geológico y Minero de España y estudios geotécnicos locales.	
Abastecimiento y drenaje	Empresas municipales encargadas del abastecimiento y saneamiento.	
Tráfico	Dirección General de Carreteras y administraciones públicas locales.	Comprobar la durabilidad

En la anterior tabla se consolida el ítem a tener en cuenta, la fuente de información para el mismo y la razón por la cual se tiene en cuenta. Vale la pena aclarar, que las fuentes naturalmente difieren según las instituciones especializadas de cada país y que para nuestro caso local, involucran importantes fuentes de información como Planeación Distrital, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), entre otros.

Respecto al criterio de la construcción, la esta institución universitaria destaca la importancia de seleccionar los materiales correctos, controlar la calidad de la ejecución y planificar el mantenimiento posterior. (NILSA, 2010, págs. 107, 151)

Por otra parte, se recomienda una serie de mínimos reglamentarios a tener en cuenta para la implementación de un SUD en espacio público:

- En las aceras de ancho superior a 1.5 m: 20% como mínimo de superficie permeable.
- Para bulevares y medianas: 50% como mínimo de superficie permeable.
- Para las plazas y zonas verdes urbanas: 35% como mínimo de superficie permeable.

(NILSA, 2010, pág. 243)

a. Aspectos de Pluviometría.

El análisis pluviométrico es clave en el diseño de un sistema alternativo sostenible de drenaje. Se trata de evaluar la zona como una cuenca que involucra un importante número de factores en los que prácticamente es necesario saber qué cantidad de agua circula por ella y que volúmenes de agua se necesita gestionar mediante SUDS. Conociendo la precipitación media de la zona de estudio, se puede calcular el caudal de diseño para una o varias de las tipologías que se desea implementar. No se quieren diseñar sistemas que al poco tiempo queden obsoletos, pero tampoco se quieren diseñar sistemas cuya infraestructura no responda a las necesidades específicas de la cuenca objeto de estudio.





Para visualizar el comportamiento de la precipitación en las ciudades seleccionadas, se realizó un consolidado en el que se registran los regímenes de precipitación para cada una de las ciudades contempladas en este documento (Tabla 6).

Tabla 6. Consolidado de regímenes de precipitación anuales medias de las ciudades seleccionadas.
Fuente: (AmbiWeb GmbH, 2014)

CIUDAD	PRECIPITACIÓN ANUAL MEDIA (mm)
Belo Horizonte	1430
Melbourne	666
Sidney	884
Vancouver	1278
Oregon	823
Washington	1023
Chicago	918
Berlín	570
Madrid	450
Barcelona	611
Londres	621
Lyon	1348

Adicionalmente, existe un criterio que relaciona el objetivo de diseño con los periodos de retorno de la lluvia en años (Tabla 7).

Tabla 7. Selección de nivel de recurrencia según objetivo de diseño.
Fuente: (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007).

Objetivo de diseño	Período de retorno de la lluvia (años)				
	0.01	0.1	1	10	100
Técnicas de infiltración					
Control de la contaminación					
Control de la erosión en el medio receptor					
Control de las inundaciones					

Se observa en la Tabla 7 que para el control de inundaciones es necesario tomar en cuenta los máximos periodos de retorno en episodios de lluvia, que mínimo toman 10 años y en los casos de infraestructura más robusta, se contemplan desde los 100 años en adelante.

La esencia de diseño y construcción de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible desde la perspectiva pluviométrica es consolidada por Momparler y Dòmenech (2007) en la frase siguiente: *“Un diseño integral desde el punto de vista de la calidad y la cantidad debe trabajar con todo el espectro de eventos de lluvia, desde los eventos frecuentes y de pequeña entidad hasta los eventos raros y de gran magnitud”*.

b. Aspectos Hidráulicos:

Se trata de una variable de suma importancia en el proceso de diseño para la determinación de volúmenes útiles de almacenamiento en diferentes infraestructuras. También se tiene en cuenta los condicionantes climatológicos locales, razón por la que en una misma zona pueden variar los ratios volumétricos (volumen de almacenamiento por unidad de superficie impermeable) que se quieran adoptar (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007).

Para el diseño de SUDS es importante conocer en qué capacidad está el sistema para evacuar determinada cantidad de agua. Por esa razón el conocimiento del tipo de SUDS que se va a diseñar supone la identificación de los materiales con los que se va a construir: tipos y diámetros de tuberías, aditamentos, material entre las capas que conforman el sistema (concreto, gravas, arenas) y sus respectivas propiedades (densidad, conductividad hidráulica, etc.), tipo de cobertura vegetal según la tipología, tipo de conducción del agua captada por el sistema en donde generalmente se procura realizar la misma por gravedad y en el sentido de evacuación de la cuenca.

La pre-selección va relacionada con el espacio disponible para la construcción de los SUDS y se realiza en función del tipo de espacio disponible, tasa de infiltración del suelo, profundidad del nivel freático estacional más alto y área tributaria (Montaña Duque, 2010).

Esta área se define como el área que durante un evento de lluvia, drena al SUDS la escorrentía superficial, lo que va asociado a la topografía y corresponde a una parte o al área total de desarrollo urbano.

En la Tabla 8, se relaciona el espacio requerido por 5 diferentes tipologías, teniendo que la pre-selección del pavimento poroso descarta inmediatamente la posibilidad de las demás alternativas. Lo mismo aplica al elegir una de las otras tipologías de tipo depósito, y que evidentemente compiten por el tipo de espacio requerido para ser implementados. (Montaña Duque, 2010).

Tabla 8. Características requeridas para la pre-selección de SUDS.

Fuente: (Montaña Duque, 2010)

SUDS	Tipo de espacio	Tasa de infiltración del suelo (mm/h)	Profundidad del nivel freático ^a (m)	Área tributaria al SUDS ^b (ha)
Pavimento poroso	Parqueadero o acera	≥12	≥0.6	^c
Depósito de infiltración	Parque, zona verde o espacio abierto	12 - 76	≥1.2	≤5.0
Depósito de detención		^d	≥1.0	≥4.0
Estanque de retención		^d	≥1.0	≥6.0
Humedal construido		^d	≥1.0	≥8.0

Fuente: Basado en la revisión de Madge (2004), Woods-Ballard *et al.* (2007) y Ellis *et al.* (2008).

^a Profundidad desde el fondo de la instalación al nivel freático.

^b Dependiendo de la topografía, puede corresponder a una parte o al área total del desarrollo urbano.

^c Relación máxima área tributaria : área de pavimento poroso = 3:1

^d No es una característica influyente en la tecnología.

c. Tratamiento y eliminación de contaminantes:

Si de sistemas integrales se habla, no se puede dejar de lado el tratamiento y eliminación de contaminantes del agua de escorrentía, teniendo en cuenta que el hecho de conducirla y almacenarla es una oportunidad para mejorar sus características físicas y químicas para un posterior aprovechamiento. Un punto favorable y a tener en cuenta en el diseño de SUDS es que los diseños originales no son estrictos e inmodificables, siempre están sujetos a combinarse para satisfacer las necesidades locales. Para el tratamiento y eliminación de contaminantes, vale la pena resaltar los mecanismos descritos en la Tabla 9.

Tabla 9. Mecanismos de eliminación de contaminantes para SUDS.**Fuente: (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007).**

Mecanismo de eliminación	Descripción
Sedimentación	Es uno de los mecanismos fundamentales; gran parte de los contaminantes están ligados a fracciones de sedimento, por lo que la eliminación de éstas redundaría en una reducción de los contaminantes asociados.
Filtración y Bio-filtración	Los contaminantes transportados en asociación con los sedimentos deben ser filtrados antes de la infiltración de las aguas; esto puede efectuarse mediante elementos vegetales, geotextiles o filtros naturales.
Adsorción	Es un proceso complejo por el cual los contaminantes son retenidos al entrar en contacto con ciertas partículas del suelo.
Biodegradación	Además de los procesos químicos, se pueden establecer igualmente procesos biológicos de degradación.
Volatilización	La transformación de ciertos contaminantes en gases puede ocurrir en compuestos derivados del petróleo y en ciertos pesticidas.
Precipitación	Es el mecanismo más común para eliminar metales pesados, transformando constituyentes solubles en partículas insolubles, eliminadas por sedimentación.
Plantas	El consumo de nutrientes por parte de las plantas es un mecanismo importante de eliminación de contaminantes como fósforo y nitrógeno.
Nitrificación	Proceso en el cual el amonio se transforma primero en nitrito y éste en nitrato, mediante la acción de las bacterias aerobias del suelo. Los nitratos pueden ser consumidos por las especies vegetales.

a. Topografía, suelos y capacidades de infiltración.

Tan importante como la evaluación de la precipitación local es la variable topográfica, que representa una de las condiciones fundamentales a tener en cuenta cuando de implementar estos sistemas se trata. Dado que el propósito de los SUDS es drenar de manera rápida, sostenible y eficiente, lo ideal es aprovechar las pendientes que ofrece el terreno que a la larga mediante un óptimo diseño, pueden favorecer de manera sustancial el drenaje de las aguas lluvias captadas mediante su evacuación por gravedad. Naturalmente se presentarán casos en donde la topografía sea difícil y no brinde las condiciones mínimas de pendientes para desarrollar una medida de drenaje sostenible, pero es de resaltar que uno de los puntos que fortalecen la adopción de

estos sistemas es la variedad de tipologías que pueden ajustarse en gran medida para cada necesidad y caso específico. Lo anterior, evidentemente supone realizar un análisis más profundo del terreno a drenar incorporando ingeniería de detalle que soporte la selección de determinado sistema. En la tabla se establece una relación entre algunos de los SUDS más conocidos, algunas características de los suelos y adicionalmente, se relacionan las condiciones máximas de pendiente y el área de drenaje y la carga hidráulica de cada sistema.

Tabla 10 - Condiciones de Drenaje para algunas tipologías SUDS.

Fuente: (SDUS, 2012)

TDSU		Suelo	Nivel freático	Área de drenaje	Pendiente	Carga hidráulica
Estanques	Secos	Los suelos granulares demandan impermeabilización de fondo y laterales.	1,2 metros	-	15% max.	1,8-2,5 metros
	Húmedos			10 ha. min.		
Humedales		Los suelos granulares demandan impermeabilización de fondo y laterales.	1,2 metros	10 ha. min	8% max.	1-1,5 metros
Infiltración	Zanja	Permeabilidad mínima de 12 mm/hora.	1,2 metros (0,6 m para zonas planas)	2 ha. min	15% max.	0,3 metros
	Estanque			5 ha. min		0,6 metros
Biofiltros vegetales	Biorretención	Usan suelos mezclados in situ	-	1 ha. min	6% max.	
	Canales de césped		0,6 metros	2 ha. min	4% max.	
	Zanja filtrante		-	-	6% max.a	-
Filtros	Arena	Sin problemas	0,6 metros	5 ha. min	-	1,5 metros
	Perimetrales			1 ha. min		0,7-0,9 metros
	Subterráneos			1 ha. min		1,5-2,2 metros

Ahora bien, no solo es importante la topografía disponible en el terreno sino la composición de los suelos a intervenir, ya que de esto depende que se predeterminen sistemas de infiltración o de captación y conducción. En ese orden, suelos con mayor porosidad favorecen la infiltración y la recarga de acuíferos, pero suelos con tendencias a las arcillas y los limos solo suponen la captación y transporte de las aguas lluvias captadas. En la tabla se relacionan las propiedades más importantes de los grupos de suelos:

Tabla 11. Propiedades más importantes de los grupos de suelos.

Fuente: (PUCV, 2013)

Denominaciones típicas de los de los grupos de suelos.	Símbolo del grupo	PROPIEDADES MAS IMPORTANTES			
		Permeabilidad en estado compactado	Resistencia al corte en estado compacto y saturado excelente	Compresibilidad en estado compacto y saturado.	Facilidad de tratamiento en obra.
Gravas bien graduadas,mezclas de grava y arenas con pocos finos o sin ellos.	G W	Permeable	Excelente	Despreciable	Excelente
Gravas mal graduadas,mezclas de arena y grava con pocos finos o sin ellos.	G P	Muy permeable	Buena	Despreciable	Buena
Gravas limosas mal graduadas mezclas de gravas,arena y limo.	G M	Semipermeable a impermeable.	Buena	Despreciable	Buena
Gravas arcillosas, mezclas mal graduadas de gravas,arena y arcilla.	G S	Im permeable	Buena a regular	Muy baja	Buena
Arenas bien graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos.	S W	Permeable	Excelente	Despreciable	Excelente
Arenas mal graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos.	S P	Permeable	Buena	Muy baja	Regular
Arenas limosas,mezclas de arena y limo mal graduadas.	S M	Semipermeable a impermeable.	Buena	Baja	Regular
Arenas arcillosas,mezclas de arena y arcilla mal graduadas.	SC	Im permeable	Buena a regular	Baja	Buena
Limos inorgánicos y arenas muy finas polvo de roca, arenas finas arcillosas o limosas con ligera plasticidad	ML	Semipermeable a impermeable.	Regular	Media	Regular
Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras	CL	Im permeable	Regular	Media	Buena a Regular
Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.	OL	Semipermeable a impermeable.	Deficiente	Media	Regular
Limos inorgánicos, suelos finos arenosos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos	MH	Semipermeable a impermeable.	Regular a deficiente	elevada	Deficiente
Arcillas inorgánicas de elevada plasticidad, arcillas grasas	CH	Im permeable	Deficiente	elevada	Deficiente
Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta	OH	Im permeable	Deficiente	elevada	Deficiente
Turba y otros suelos inorgánicos	Pt	-	-	-	-

b. Mantenimiento:

No es suficiente con diseñar un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible, construirlo y pretender que este funcione de la misma manera indefinidamente sin tener en cuenta el mantenimiento del mismo. Como todo sistema, sea convencional o SUD requiere un mantenimiento estricto que deberá ser planeado desde la misma etapa de diseño, ya que debe ser contemplado en los costos y se debe asignar la responsabilidad al organismo competente a nivel local, en el que se tienen en cuenta la titularidad de toda la infraestructura, la ubicación, la periodicidad, las herramientas para llevar a cabo los mantenimientos, el tiempo máximo que la estructura puede funcionar sin mantenimiento, contingencias, etc. (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007).

Lo anterior se planea de acuerdo a la tipología diseñada en el que usualmente, se debe realizar cambio de los medios filtrantes para evitar la colmatación y que en consecuencia el volumen de agua infiltrada varíe, el riego y fortalecimiento de la cobertura vegetal así como la verificación de su estado, el estado de las estructuras, tuberías y aditamentos en general.



Figura 11. Mantenimiento de cunetas.
Fuente: (Abellán, 2014)

c. Impactos Ambientales

En todo la revisión realizada para la evaluación de SUDS no se encontró el registro de impactos ambientales negativos ni por uso de materiales, ni por alteración permanente de paisaje, ni por uso o explotación de recursos, ya que si bien se realiza una intervención en el medio ambiente localizado en la cuenca, las obras que se desarrollan para construir estos sistemas tienen el propósito de incorporar, recuperar y estimular el desarrollo natural del ciclo del agua, reduciendo el porcentaje de áreas impermeabilizadas.

Con una gestión apropiada, un diseño de acuerdo a las condiciones locales del sitio, los únicos impactos ambientales negativos que podrían existir tendrían lugar en la etapa de construcción y estos a su vez, serían de mínima magnitud (ruido proveniente de las máquinas, impacto paisajístico en la adecuación del sistema, intervención temporal de cauces urbanos, entre otros).

5.3 IMPLEMENTACIÓN, EJECUCIÓN E INCENTIVOS

La participación social y el compromiso de la sociedad en su totalidad son fundamentales para que cualquier iniciativa de sostenibilidad se mantenga en el tiempo y de los frutos esperados. En cuestiones del medio ambiente las responsabilidades nunca pueden ser relegadas porque en mayor o menor grado, todo lo que suceda alrededor puede beneficiar o perjudicar seriamente la calidad de vida de todo ser humano sin excepción. Es por eso que no basta con obtener un diseño tras varios análisis, invertir grandes sumas de dinero en capital humano y tecnológico para remediar agudos problemas (y que a la larga suele ser la vía más costosa) cuando no se concretan una serie de mínimos para que los problemas no se repitan, es decir, empezar a abordar las problemáticas desde la perspectiva preventiva es lo moderno. Se trabaja en metodologías correctivas pero sin dejar de lado el planteamiento y ejecución de las medidas preventivas. En el caso de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, varias ciudades alrededor del mundo se encuentran adelantadas en cuanto a la implementación de medidas estructurales o correctivas. Sin embargo, existen también las que, han formulado iniciativas con el objeto de incentivar la construcción sostenible y reducir a mediano y largo plazo los efectos colaterales de la urbanización que dentro de su planeación no contempla los impactos negativos de fondo y lo peor, no visibles en el corto plazo.

A continuación se describen las experiencias a nivel internacional, en cuanto a la implementación, ejecución e incentivos de SUDS:

Belo Horizonte: A partir de la década de 1990 surgen importantes cambios en la gestión del agua urbana, tanto en materia de desarrollo institucional como en aspectos tecnológicos. Dichos cambios son consolidados en la Política municipal para la Gestión del Agua Urbana, que establece como objetivos principales garantizar a nivel municipal la formulación de políticas del agua urbana, promover la universalidad del acceso a los servicios de saneamiento (agua

potable, aguas pluviales, gestión de residuos sólidos) y finalmente, la reducción significativa y el cuidado de los cuerpos de agua. Todo lo anterior para garantizar que las aguas urbanas se gestionarán con base en la participación de la población en general (Nascimiento et al., 2008).

Australia y Estados Unidos: Se han implementado diversos programas que desde la perspectiva económica, ofrecen incentivos financieros para llevar a cabo acciones que minimicen todo lo posible los impactos de las aguas lluvias mediante técnicas de Drenaje Urbano Sostenible; dichos programas usualmente involucran eventos de divulgación y formación para la población respecto al tema. Por ejemplo en ocasiones se ofrece asistencia técnica y subvenciones para desconectar las bajantes de las redes pluviales o para implementar cubiertas verdes o se destinan recursos para fortalecer actividades que han ayudado de cierta forma a comprender la relevancia del desarrollo urbano y el impacto que las aguas lluvias tiene en el medio ambiente. Simultáneamente, existen programas que buscan la reconstrucción de vías con materiales permeables con base en la gestión de las aguas lluvias y su recogida directa en las calles.

El Cumplimiento Alternativo es un término usado en estos países y se refiere a la posibilidad que ofrecen algunas administraciones para quienes promuevan urbanizaciones que cumplan con los objetivos de gestión integral de las aguas pluviales de la ciudad donde se construyen (Puddephatt et al., 2007 como se cita en Martínez Soriano, 2012). La flexibilidad que brinda el gobierno para el cumplimiento de los objetivos permite a los promotores de un desarrollo urbanístico pagar al gobierno local para que se implementen las medidas de gestión de las aguas pluviales aunque sea en lugares diferentes, dentro de la cuenca hidrográfica en casos donde no es posible gestionar el drenaje urbano en el lugar que se está urbanizando, por limitaciones de espacio, por el tipo de suelo, por la profundidad a la que se encuentran las aguas subterráneas, por los costes de construcción, etc. (Pristel, 2011 como se cita en Martínez Soriano, 2012).

Otro incentivo se enfoca en los descuentos en tarifas. Estos incentivos se vienen utilizando en Oregon y Washington, en Estados Unidos y en el Estado de Victoria, Australia. Consiste en la reducción de las tarifas cánones de los impuestos residenciales y comerciales asociadas a la gestión de las aguas pluviales si se emplean técnicas de drenaje urbano sostenible. En Australia por ejemplo, se emplean técnicas in situ como la implementación de tanques de agua de lluvia, inodoros con doble descarga, sistema de aguas grises, cabezas de ducha eficiente, etc. Esto es financiado por el Estado a través de descuentos en la factura del agua, de acuerdo con Puddephatt et al. (como se cita en Martínez Soriano, 2012, pág. 13). Para los casos que en los que no se adopte ninguna alternativa de drenaje sostenible y si adicionalmente, el caudal de escorrentía de una propiedad aumenta, también aumenta la tasa de gestión de aguas residuales para el propietario. La razón es simple: entre mayor sea el volumen de aguas de escorrentía, mayor es el costo de tratamiento y distribución del agua potable (Sánchez Pachón, 2010).

En Australia, lograr un mejor desempeño ecológico de los cursos de agua superficial se basa en la colaboración de las partes asociadas a la cadena de gestión. Cuando estas asociaciones son fundamentalmente de tipo intergubernamental, las organizaciones líderes deben tener en cuenta algunos principios con el fin de lograr mejoras ecológicas a largo plazo:

- El compromiso y la capacidad de organización varían de acuerdo a las condiciones locales y los estilos de gobierno.
- El diseño del programa debe incorporar y responder a una evaluación de las condiciones locales, la capacidad de organización y compromiso organizacional antes de, y en los puntos críticos durante la ejecución.

Estos principios no sólo se aplican a la ciudad de Melbourne, ya que a nivel internacional la gestión de las aguas pluviales urbanas es una responsabilidad compartida de varios gobiernos. El éxito depende de la capacidad de organización evaluación del compromiso de quienes desean implementar este tipo de medidas(Morrison, 2008).

Cálculo de Incentivos económicos en Washington:

De acuerdo con Sánchez (2010), en la Tabla 11 establece una serie de ecuaciones para el cálculo de costos de incentivos para la implementación de 3 tipologías de SUDS diferentes

Tabla 12. Cálculo de Incentivos para la Implementación de SUDS en Washington D.C.

Fuente: (Sánchez Pachón, 2010)

Sistema	Ecuación de costes	Coste por la gestión de 40,000m³
Embalse en superficie	$C = 5.2 * V^{0.826}$	US\$35 millones
Depósitos subterráneos	$C = 7.1 * V^{0.795}$	US\$44 millones
Balsas de retención	$C = 62.6 * V^{0.69}$	\$390,000

Según Sánchez (2010), las aguas residuales consisten en la suma de las aguas evacuadas más las aguas de escorrentía ajustadas por un factor en caso de haber sistema de drenaje natural. Las aguas de escorrentía se calculan en base a la superficie de la propiedad multiplicada por la proporción de la superficie que es impermeable y, a su vez, multiplicada por la precipitación media anual.

En ese orden de ideas, el cálculo de aguas de escorrentía es ajustado, a su vez, por un coeficiente que valora la instalación de sistemas de drenaje natural, reduciendo el porcentaje de superficie impermeable. En consecuencia, existirá un incentivo económico para que los dueños de propiedades asuman el costo de instalar sistemas de drenaje natural (Sánchez Pachón, 2010).

Herramientas de Gestión:

Tal como lo afirma Sánchez (2010):

“Las municipalidades tienen la capacidad de fomentar la adopción de sistemas de drenaje natural en zonas urbanas a través de ordenanzas, impuestos, etc. Una opción es adoptar políticas que favorecen la gestión de aguas de escorrentía en su origen, sin especificar cómo llegar a ello. Otra opción es la adopción o actualización de las normativas de gestión de aguas de escorrentía, cuya aplicación sea obligatoria para proyectos de construcción. Por ejemplo, la normativa del 2009 de la ciudad de Chicago (EE.UU.) establece un parámetro técnico de rendimiento, limitando el caudal máximo así como el volumen total de escorrentía permitidos para una obra nueva”.

La normatividad generalmente no especifica las técnicas que deben ser empleadas, mas dejan la posibilidad de acoger las mejores prácticas teniendo en cuenta las necesidades de cada proyecto.

En **Chicago** se ha iniciado una serie de proyectos que requerirán de cerca de US\$3.500 millones hasta el 2019. Ha iniciado con el establecimiento de un equipo “*crack*” que se encarga de procesar permisos de nuevas obras en edificios que involucren en su diseño techos verdes o *Green roofs*. Lo que hacen es acelerar el otorgamiento de la licencia, en un trámite que normalmente toma dos años y lo reducen a seis meses. Sánchez menciona que la reducción en el tiempo es un gran incentivo para agencias inmobiliarias y el costo adicional para la ciudad es mínimo. También resalta la importancia de los organismos municipales ya que juegan un papel importante en la “actualización de normativas históricas y recientes en el ámbito de la construcción”, que necesariamente debe tener en cuenta los nuevos principios de urbanismo. Pero no todo es un asunto perfecto. Existen normas que en algunos casos, pueden limitar la instalación de sistemas de drenaje naturales. Algunos ejemplos de estas normativas según Sánchez, son los requerimientos de capacidad mínima de carga de asfaltos, el ancho mínimo de calles para el paso de camiones contra incendios y la localización de infraestructura soterrada para gas, electricidad y telefonía. Por esa razón, se requiere de una participación

multisectorial, que involucre a las empresas de servicios públicos, autoridades gubernamentales, municipales y regionales(Sánchez Pachón, 2010).

Canadá: En Vancouver, Canadá se otorga un subsidio para la compra de barriles para la captación, almacenamiento y aprovechamiento de aguas lluvias. Se trata de un programa piloto en el que el volumen a almacenar en los tanques plásticos es equivalente a 75 galones (288L) que son entregados por un costo de U\$ 40 incluidos los impuestos. El barril se utiliza para recolectar agua lluvia proveniente de los techos, que posteriormente se usa para mantenimiento de áreas verdes. Se afirma que cada barril puede ahorrar cerca de 1.3000 galones (4.920 litros) de agua durante los meses de verano donde la demanda de agua es más alta (Ballén Suárez et al.,2006).

Alemania (Berlín): De acuerdo con lo expuesto por Lucía Soriano en el *CONAMA 2012*, Alemania es punto de referencia tanto de la experiencia de aplicación de instrumentos económicos en la gestión de aguas pluviales como en el marco normativo de las mismas.

En lo referente a la aplicación de instrumentos económicos, sobresale el apoyo para la construcción de techos verdes, siendo esta una de las tipologías más implementadas en este país para la reducción de escorrentías en eventos de precipitación. Es así como esta tipología está siendo ampliamente implementada en algunas ciudades alemanas siendo estas impulsadas mediante ayudas públicas que consisten en la reducción de impuestos. Se observa también que un 43% de las ciudades alemanas ofrecen incentivos financieros para la instalación de techos verdes.

Para abordar el tema con mayor claridad, basta con observar las siguientes cifras:

- ✓ 29 Grandes ciudades, entre ellas Berlín, dan apoyo financiero directo para este tipo de tecnologías que van desde 5 €/m² de cubierta a 50/m², o entre el 25 y el 100% de la instalación. Las subvenciones se basan en estimaciones de costes evitados asociados

con el mantenimiento de la infraestructura y su reposición. Sólo están subvencionadas las inversiones.

- ✓ · El 17 % de las ciudades alemanas ofrecen ayudas indirectas por la construcción de tejados verdes consistentes en una reducción en las tasas que cobran por el alcantarillado.
- ✓ Otras 13 ciudades alemanas permiten una reducción de entre el 50% y el 80% en el impuesto denominado "*rain tax*" para la instalación de techos verdes. Considerando una vida útil de 36 años para este tipo de cubiertas, la reducción fiscal puede compensar al propietario del edificio hasta un 50% de los costes adicionales asociados a este tipo de instalaciones frente a otras convencionales.

Existen además de las anteriores, otro tipo de instrumentos aplicados con éxito en Alemania, como lo es el caso de los incentivos para la gestión de aguas pluviales in situ. En Berlín por ejemplo, los propietarios pagan por la escorrentía de aguas pluviales en función de la superficie impermeable de su propiedad (Soriano, 2012). De esta forma, quienes en su propiedad tengan medidas de gestión como desconexión de bajantes, pavimentos permeables, técnicas de infiltración, etc., tienen derecho a descuentos en lo referente a escorrentías superficiales.

En cuanto a la experiencia de Alemania frente a la ejecución de políticas que regulen la escorrentía urbana, en Alemania como en otros lugares del mundo, el aumento de las superficies impermeables como consecuencia del desarrollo urbano, ha incrementado el volumen y la velocidad de la escorrentía de aguas pluviales. En este caso, según Soriano, los planes de ordenación del territorio alemán establecen algunas medidas para evitar estos efectos negativos sobre el ciclo hidrológico (Soriano, 2012). La Tabla 12 describe los elementos incluidos en la planeación urbana.

Tabla 13. Elementos de la planeación urbana.
Fuente: (Martínez Soriano, 2012).

<i>LIMITES DE LA IMPERMEABILIZACIÓN DE SUPERFICIES</i>	<i>PROPORCIÓN DE SUPERFICIE DESTINADA A LA INFILTRACIÓN, COMPATIBLE CON LOS USOS Y LA IMPERMEABILIZACIÓN DEL TERRENO</i>	<i>MEDIDAS PARA RETENER E INFILTRAR AGUAS PLUVIALES.</i>
Establecimiento de un límite superior de m² construido/m² de parcela. La adopción de uno u otro valor para esta relación tiene que estar justificada en el planeamiento urbano.	Con base en el Artículo 9 del Código Alemán de Edificación, documento que es de carácter federal, se puede establecer como tiene que ser la estructura de las zonas de tráfico, la vegetación de las márgenes de carreteras o las zonas verdes en general. Adicionalmente, los nuevos desarrollos urbanísticos tienen que incorporar elementos ecológicos en su diseño.	A través del planeamiento urbano también se establecen áreas para la construcción de instalaciones de gestión del agua lluvia como por ejemplo, los tanques de retención. También se suelen adoptar medidas relacionadas con el empleo de cubiertas vegetales o verdes.

En general, la principal característica del sistema alemán se presenta en las tarifas del agua, ya que las aguas que son evacuadas mediante la red de saneamiento convencional tienen que someterse a tratamiento, situación que genera costos facturados a la población que se beneficia de las redes de alcantarillado. Así por ejemplo, en el caso de Berlín, esos costos son calculados con base en las superficies impermeabilizadas que han sido conectadas a la red de alcantarillado. En la facturación del servicio que allí se realiza, se especifica el tipo de superficie y su impermeabilidad, y entre más permeable sea la superficie, menos hay que pagar por el servicio (Soriano, 2012).

Francia: En cuanto a incentivos económicos, se han aplicado reducciones en el impuesto sobre la renta derivada de inversiones en la recogida de agua lluvia y en su reutilización. El propósito de esta medida es disminuir la cantidad de aguas lluvias que fluyen por los sistemas convencionales de saneamiento pero adicional a esto, fomentar la reutilización del agua pluvial y disminuir el consumo de agua potable. En este orden, la población que invierte en la recogida de aguas lluvias pueden beneficiarse de una reducción de impuestos del 25% del total de

gastos asociados a la instalación de estos dispositivos. Así entonces, para una vivienda, los gastos totales que pueden deducirse no serán superiores a 8000 € por persona o 16000 € por pareja para el periodo comprendido entre 1 de enero de 2007 y 31 de diciembre de 2012. Según Soriano, “el decreto de gobierno que introduce el sistema indica las especificaciones técnicas que tienen que tener los equipos que pueden ser instalados”. Además, se hace claridad en que la reducción fiscal solo aplica para la reutilización de aguas pluviales para usos al aire libre (como jardinería, riego de espacios públicos verdes, lavado de autos) y para usos interiores como inodoros y limpieza de pisos. Este modelo cuenta con algunas restricciones como por ejemplo, la aplicación a algunos edificios públicos o de carácter social (Martínez Soriano, 2012).

En cuanto al Marco normativo legislativo de las aguas pluviales en Francia y desde la perspectiva de ordenación del territorio, vale la pena destacar la Ley Grenelle I y Ley Grenelle II. Ambas leyes tienen como propósito buscar un patrón de crecimiento diferente, según Lefèvre (como se cita en Martínez Soriano, 2012). Lo anterior demuestra que ahora la planificación territorial y el desarrollo sostenible aparte de centrar su atención en garantizar la sostenibilidad ecológica, el mejoramiento de la eficiencia energética y la reducción de gases de efecto invernadero, se enfoca también en el planteamiento de nuevos planes de prevención de riesgos naturales, planes de energía y cambio climático. Ambas leyes, adicional a la parte operativa, cuentan con una amplia gama de instrumentos financieros y fiscales, por ejemplo, un impuesto anual para la gestión de aguas pluviales.

Finalmente, existen otros Instrumentos legales como la Ley de Aguas y Medios acuáticos del 30 de diciembre de 2008 que entre otras cosas, permitió a los ayuntamientos promover un impuesto local específico para la gestión de aguas lluvias de 0.20 euros/m² como máximo. Simultáneamente, esta ley instauró líneas de crédito con el objetivo de financiar trabajos relacionados con la recuperación de aguas lluvias y permitió su utilización en usos exteriores a las viviendas (Martínez Soriano, 2012).

España: Se establece que en los procesos de urbanización debe minimizarse la proporción de espacios impermeabilizados (como los pavimentos impermeables), con el objeto de favorecer la infiltración, estableciendo unos mínimos de permeabilidad en aceras, bulevares, medianas, plazas y zonas verdes urbanas. Así, empiezan a aparecer planes urbanísticos concebidos desde su inicio con una perspectiva de SUDS; este es el caso de actuaciones en los barrios de Torre Baró y La Marina del Prat Vermell en Barcelona o Plata y Castañar en Villaverde, Madrid. (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2007)

5.4 CONDICIONES AMBIENTALES LOCALES DE BOGOTÁ D.C

Bogotá continúa con sus procesos de expansión urbana y requiere la adopción de sistemas de evacuación y aprovechamiento de aguas lluvias que en el futuro, puedan prevenir inundaciones, integrarse paisajísticamente sin alterar el ciclo natural del agua y aprovechar el agua lluvia como recurso potencial de abastecimiento en la ciudad. Por esa razón, es importante realizar estudios que promuevan la adopción de nuevas alternativas bajo la luz de la sostenibilidad y sustentabilidad, haciendo de Bogotá un modelo de ciudad. Se encuentra ubicada en el centro del país, en la cordillera oriental, con una extensión aproximada de 33 kilómetros de sur y norte y 16 kilómetros de oriente a occidente. Se encuentra situada en las siguientes coordenadas: Latitud Norte: 4° 35'56" y Longitud Oeste de Greenwich: 74°04'51". Está dentro de la Zona de Confluencia Intertropical, produciendo dos épocas de lluvia: en la primera mitad del año en los meses de marzo, abril y mayo y en la segunda en los meses de septiembre, octubre y noviembre.

La temperatura varía de acuerdo con los meses del año, en diciembre, enero y marzo son altas, al contrario de abril y octubre en donde son más bajas. Su altura media está en los 2.625 metros sobre el nivel del mar. Bogotá se caracteriza por tener un clima moderadamente frío,

con cerca de 14 °C en promedio y una humedad aproximada del 80%(Alcaldía Mayor de Bogotá, 2014).



Figura 12. Imágenes de Bogotá. Fuente: (Empresa Exterior, 2014; Alta Consejería Distrital de TIC, 2014)

Precipitación: En general la ciudad de Bogotá presenta dos periodos de lluvia prolongada durante el año y dos periodos de menor precipitación de los cuales el primero es conocido como invierno y el segundo como verano aunque tengan lugar algunas lluvias aisladas. El primer periodo inicia en marzo, dura todo el mes de abril y finaliza en el mes de mayo. El segundo periodo, comienza en septiembre, dura todo el mes de octubre y finaliza en noviembre. Sin embargo, existen meses de transición entre periodos que generalmente, se sitúan en los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre (IDEAM, 2004).

- Análisis Temporal de la Precipitación

En el estudio de caracterización climática de Bogotá se realizó el análisis temporal de la precipitación para la ciudad, teniendo en cuenta dos zonas: la primera denominada zona urbana, se conforma de la ciudad de Bogotá y la parte baja del río Tunjuelo. La zona rural, está comprendida por la cuenca media y alta del río Tunjuelo y los cerros orientales que bordean la ciudad.

La Zona Urbana presenta un régimen bimodal con dos periodos lluviosos: el primero entre los meses de abril y mayo y el segundo entre los meses de octubre y noviembre. El primer periodo se caracteriza por valores que oscilan de 69 mm en la localidad de Bosa – Barreno al occidente de Bogotá hasta los 142 mm en el sector de Torca al norte de la ciudad. Para el segundo

periodo se presentan registros de 70 mm al occidente en Bosa – Barreno y al sur en Santa Lucia, hasta los 126 mm en diversos sectores del norte como Torca, Contador y el área de la ciudad universitaria.

Respecto a los periodos secos, el primero se sitúa entre los meses de enero y febrero las lluvias van desde los 20 mm al occidente en Bosa – Barreno y en los sectores de Torca y Contador al norte de la ciudad con 80 y 82 mm respectivamente. Para el segundo periodo seco, que tiene lugar entre los meses de julio y agosto, la precipitación oscila entre los 33 mm del sector de Bosa Barreno y los 74 mm en las zonas del centro y parte baja de los cerros orientales.

En cuanto a la Zona Rural, el área de la cuenca del rio Tunjuelo presenta un régimen de carácter mono modal en su parte más alta dado que esta zona está influenciada por el régimen de lluvias de los Llanos Orientales. Presenta una temporada lluviosa desde el mes de abril hasta el mes de noviembre, y otro periodo seco que se extiende de diciembre a marzo. Para el periodo lluvioso, las lluvias oscilan entre los 64 mm en el sector de El Hato para el mes de septiembre y los 214 mm en el área Bocagrande –Salitre al oriente de la parte alta de la cuenca del rio Curubita I, afluente del rio Tunjuelo en el mes de julio.

Para el periodo seco definido entre diciembre y marzo, las lluvias van desde los 20 mm en el sector de El Hato y La Regadera en la parte alta de la cuenca, hasta los 86 mm en el sector Bocagrande – Salitre.

Para el caso de los cerros orientales, el régimen de precipitación se manifiesta como bimodal no acentuado, de acuerdo con los registros de las estaciones más cercanas a la ciudad como el Granizo, San Francisco Salitre y Vitelma. Los periodos lluviosos se sitúan entre abril y mayo, y el segundo entre octubre y noviembre con precipitaciones que oscilan entre los 114 y los 128 mm para el primer periodo y de 119 a 135 mm para el segundo. En las temporadas secas, la más acentuada tiene lugar entre enero y febrero, donde las lluvias van desde 59 hasta los 71 mm, siendo más baja en Vitelma con un valor de 59 mm en el mes de enero (IDEAM, 2004).

Precipitación anual:

El observatorio ambiental de Bogotá actualiza con frecuencia los datos correspondientes a la información consolidada de precipitación anual para la ciudad, tomando la información de las distintas estaciones pluviométricas del IDEAM. La Tabla 13 y la Figura 12 detallan las cifras consolidadas desde el año de 1998 hasta el año 2013:

Tabla 14. Consolidado de precipitaciones anuales en Bogotá entre 1998 y 2013.

Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014)

Fecha	Precipitación Anual PA (mm)
1998	1.183,90
1999	771
2000	731
2001	436,50
2002	699
2003	423,80
2004	610,90
2005	615,40
2006	740,40
2007	647,30
2008	740,20
2009	591
2010	1.085,10
2011	948,30
2012	688,20
2013	791

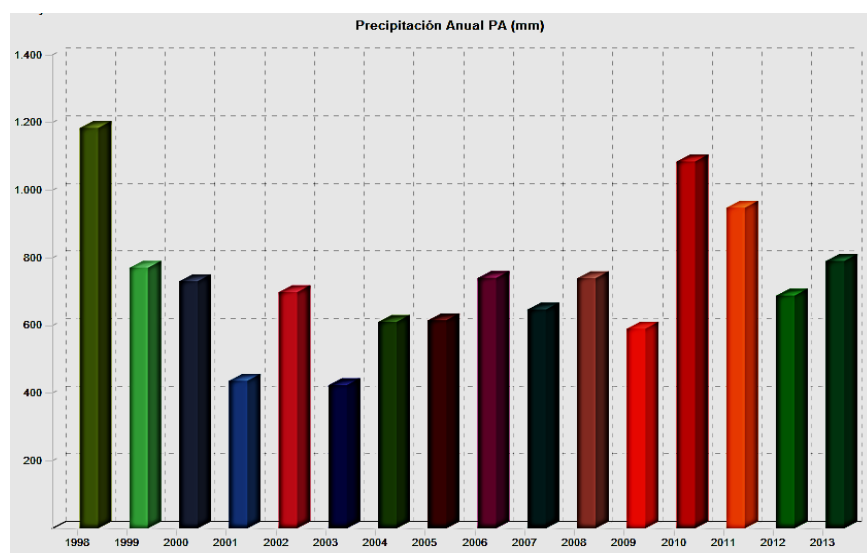


Figura 13. Consolidado de precipitaciones anuales en Bogotá entre 1998 y 2013.

Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014)

- **Geotecnia:**

En términos geológicos, la sabana de Bogotá es un sinclinorio fallado con rumbo SSW-NNE en el centro y la cresta de la Cordillera Oriental y dividido en 9 formaciones, listadas en la Tabla 14.

Para la analizar la viabilidad de implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje en la ciudad de Bogotá es de gran importancia conocer la conformación de sus suelos, comprender su geología y la composición de los mismos, ya que como se mencionaba en capítulos anteriores de este documento, la porosidad juega un papel esencial en el diseño y construcción de estos sistemas. No se quiere decir con esto que para que los sistemas sean implementados los suelos tengan que ser estrictamente de uno u otro tipo, sino que por el contrario, de acuerdo al tipo de suelo que se encuentre en la zona donde se desea construir una tipología SUDS, esta se ajuste de la mejor manera cumpliendo con el propósito para la cual fue diseñada.

La geotecnia es una disciplina bastante extensa y compleja, pero para entender de manera preliminar la composición del suelo Bogotano, se toma como referencia el artículo publicado por el geólogo Alberto Lobo-Guerrero Uscátegui, denominado

Tabla 15. Formaciones geológicas de la Sabana de Bogotá.
Fuente: (Lobo-Guerrero Uscátegui, 1992)

FORMACIONES GEOLÓGICAS DE LA SABANA DE BOGOTÁ		
Grupo Villeta	Formación Cacho	Formación Usme
Formación Guadalupe	Formación Bogotá	Formación Tilatá
Formación Guaduas	Formación Regadera	Formación Sabana

Geología e Hidrogeología de Santa fe de Bogotá y su Sabana, publicado en el año 2008, en donde se realiza una descripción detallada de cada una de las 11 formaciones que componen la Sabana.

- a. *Formación Villeta*: En la base consta de 40 m de calizas y limolitas silíceo-calcáreas, negras, en capas delgadas, fosilíferas con frecuentes nódulos calcáreos. El resto de la sucesión total es de 1300 m de espesor conformado por lutitas negras finamente laminadas con ocasionales intercalaciones de areniscas y calizas en estratos de 3 a 5 m de espesor. Hacia la parte oriental de la formación (formación chipaque), la constitución geológica es definida por arcillolitas (lutitas de compactación) predominantes de color gris oscuro a negro y finamente laminadas con baja resistencia, areniscas cuarzo – micáceas de color blanco, amarillo o gris oscuro, limolitas de gris oscuro o tabaco laminadas y frecuentemente micáceas y finalmente calizas de color gris oscuro, lumaquéticas, duras resistentes en bancos gruesos. Su espesor total es de 1700 m.
- b. *Formación Guadalupe*: Compuesta por cuatro miembros que son la arenisca dura, los Plaeners, la Arenisca de Labor y la Arenisca Tierna en la parte superior. El miembro Plaeners está compuesto por arcillolitas laminadas de dureza baja y resistencia débil en capas delgadas; limolitas silíceas laminadas en capas de 2 a 10 cm, compactas en estratos entre 5 y 20 m; por areniscas ortocuarcíticas de grano fino a muy fino, con estratificación gruesa a muy gruesa de colores blanco, gris claro, gris oscuro, gris verdoso y negro. El espesor total oscila entre 85 y 200 m. La Arenisca de Labor, está compuesta por areniscas cuarzosas blancas, grises claras y ocasionalmente amarillentas, de grano muy fino hasta medio, con dureza y resistencia moderadas en bancos delgados con intercalaciones delgadas hasta gruesas de arcillolitas grises verdosas, laminadas, débiles y limolitas silíceas grises. El espesor total oscila entre 150 y 200 m. Finalmente la Arenisca Tierna está

- compuesta por areniscas cuarzosas y feldespáticas, blanco amarillentas, de grano medio hasta conglomerático, en estratos delgados hasta muy gruesos, débilmente cementados, friables, con algunas muy delgadas intercalaciones de lutitas grises con un espesor que oscila entre 100 y 125 m. Esta unidad no aparece en todas las partes de la Sabana. Se conoce con el sector de La Cita – Codito, en Sibaté, La Herrera y en las Piedras de Tunja en Facatativá.
- c. *Formación Guaduas*: Se encuentra encima de la formación Guadalupe en los valles de Subachoque, río Frío, Checua, Suesca, Santa Rosita, Chocontá, Tominé, Teussacá, Bogotá, Usme y Soacha. No existe en el sector de Sibaté – Bojacá. Está compuesta por arcillolitas grises compactas, arcillolitas carbonáceas, bancos de arenisca, arcillolitas abigarradas y numerosos mantos de carbón situados hacia la parte inferior y media de la formación. Los sedimentos de Guaduas tienen un espesor entre 250 y 1200 m.
- d. *Formación Cacho*: Reposa concordantemente sobre el Guaduas. Compuesta por areniscas blancas, amarillas y rojizas, cuarzosas hasta grauvacas, de grano fino hasta conglomerático, pobremente cementadas por óxidos de hierro en bancos masivos con intercalaciones delgadas de arcillolitas grises, rojizas y abigarradas en la parte media de la formación. Su espesor total oscila entre 50 y 400 m.
- e. *Formación Bogotá*: Compuesta casi exclusivamente por arcillolitas abigarradas (grises, violáceas, moradas y rojas), bien estratificadas con algunos bancos de areniscas micáceas grises de grano fino hacia la parte superior de la unidad. Su espesor varía entre 800 y 2000 m.
- f. *Formación Terciario*: Compuesta por areniscas cuarzosas y cuarzofeldespáticas, poco cementadas por arcillas, de grano medio a grueso, en bancos muy gruesos. Alternando con las areniscas y los conglomerados hay delgadas capas de arcillolitas rosadas o rojizas. Su espesor alcanza hasta los 1.800 m.

- g. *Formación Usme*: Consta de un miembro inferior de arcillolitas grises con ocasionales intercalaciones de areniscas de grano fino. El miembro superior contiene areniscas cuarzosas de grano grueso y conglomerados finos con espesor total de 125 m.
- h. *Formación Tilatá*: Está compuesta por gravas, gravillas, arenas, limos, arcillas, turbas y numerosos niveles de piroclastos finos en capas lenticulares poco consolidadas. Alcanza un espesor variable entre 10 cm y 300 m.
- i. *Formación Sabana*: representa la parte superior del relleno lacustre del gran lago de la Sabana de Bogotá. Compuesta por capas horizontales poco consolidadas de arcillas plásticas grises y verdes, y en menor proporción por lentes y capas de arcillas turbosas, turbas, limos, arenas finas hasta gruesas, restos de madera y capas de diatomita. También hay numerosas capas de cenizas volcánicas. Los cerros de Suba y Madrid, así como otros cerros menores entre Soacha y Sibate fueron islas dentro del mencionado lago. Los barrios nuevos de la ciudad capital, aproximadamente al norte de la Avenida Chile y al oriente de la carrera 30, están edificados directamente sobre la Formación de la Sabana.
- j. *Formación Tunjuelo*: Corresponde al complejo de los conos fluvio – glaciares del río Tunjuelito y los ríos San Cristóbal, San Francisco, Arzobispo y las quebradas Las Delicias, La Vieja, Rosales y Chicó, en el sur y oriente de la ciudad de Bogotá y el cono del río Subachoque. La parte antigua de la capital se asienta principalmente sobre la formación Tunjuelo. Los sedimentos que constituyen el depósito son bloques hasta de 2 m de diámetro, grava, gravilla, arena, limo y arcilla. El cono se divide entre sectores: una parte alta entre la Quebrada del Aleñadero y la Quebrada de Yomasa; una parte media entre la Quebrada de Yomasa y los barrios Meissen y Tunjuelito; y una parte baja entre los citados barrios y Ciudad Kennedy. La parte alta está compuesta principalmente por arenas gruesas con grandes bloques, arcillas y

limos, con un espesor hasta de 50 m. La parte media está compuesta principalmente por gruesas capas de gravas, arenas y limos, debajo de una capa superficial de arcillas entre 7 m y 12.50 m, con un espesor total variable hasta de 150 m. En este sector se hallan las grandes explotaciones de agregados.

La parte baja está compuesta principalmente por arenas finas y arcillas, las cuales se interdigitan con los depósitos lagunares de la Formación Sabana.

Bajo la parte oriental de la ciudad se encuentran otros conos fluvio-glaciares de los ríos y quebradas San Cristóbal, San Francisco, Arzobispo, Las Delicias La Vieja, Rosales y Chicó. Todos ellos llegaban al gran lago de la Sabana.

- **Población, Paisajismo y desarrollo Urbano:**

La población, como factor determinante en los procesos de urbanización es relevante en la planeación de la ciudad. Dado que los diseños de SUDS deben ser diseñados con amplios periodos de retorno tanto para zonas urbanizadas como zonas propuestas para urbanizar, el conocimiento de la proyección de la población de la ciudad capital es clave. Las Figuras 13, 14 y 15 resumen algunas estadísticas relevantes entre los que se incluye el uso del suelo.

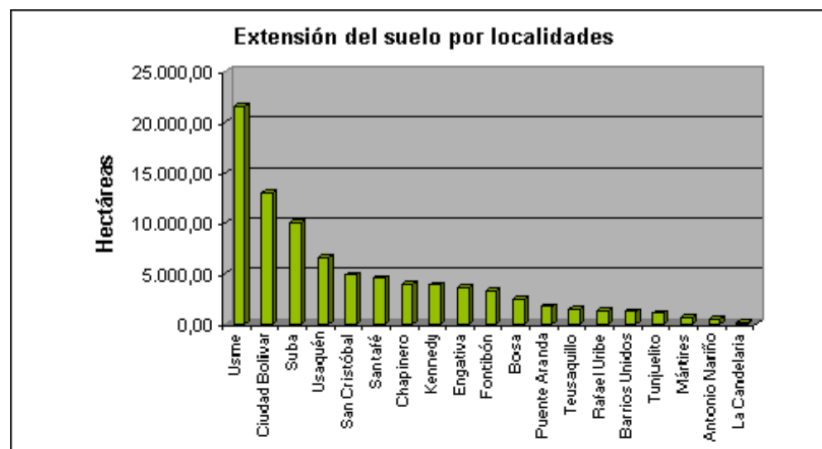


Figura 14. Extensión del suelo en Bogotá por localidades.

Fuente: (Secretaría de Hacienda)

Bogotá presenta una extensión total de 163.575,20 hectáreas repartidas en 20 localidades. Las localidades de mayor extensión son en su orden: Usme, Ciudad Bolívar, Suba, Usaquén y San Cristóbal; estas 5 localidades abarcan el 34% del área total de la ciudad. Se observa mediante diagrama circular, la extensión y composición del suelo en Bogotá.

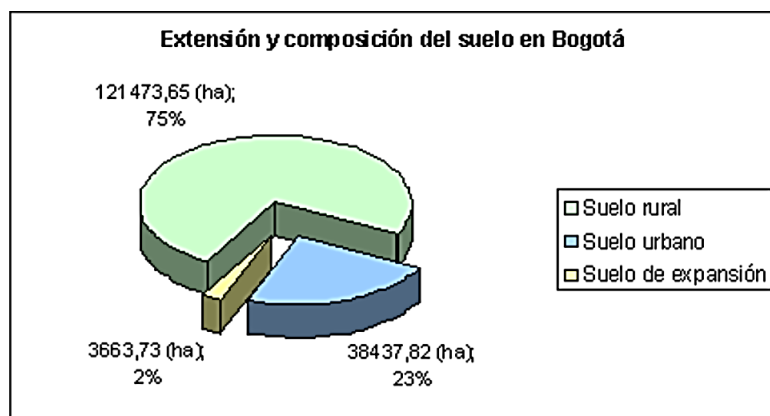


Figura 15. Extensión y Composición del suelo en la capital.
Fuente: (Secretaría de Hacienda)

Si bien el suelo en expansión corresponde tan solo al 2% de la composición total del suelo de Bogotá, esto implica además de una responsabilidad en cuanto a la forma como será urbanizado, una oportunidad para desarrollar los programas de sostenibilidad que incluyan de manera contundente la gestión de las aguas urbanas.

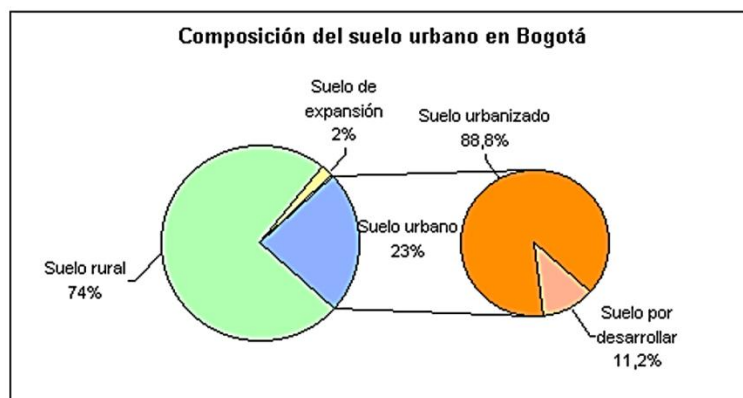


Figura 16. Composición del suelo Urbano en Bogotá.
Fuente: (Secretaría de Hacienda)

En la figura anterior se observa que respecto a la distribución del suelo y su estado actual en la ciudad capital, el porcentaje a desarrollar es del 11,2%, lo que ratifica la oportunidad que se tiene respecto a las mejoras en el desarrollo y la construcción de la ciudad, implementando ya sean medidas de tipo estructural y no estructural para la gestión integral del agua urbana de Bogotá. Es claro que la responsabilidad directa en cuanto a la planificación de estos sistemas es el ente gubernamental local que planea y ordena el territorio, y son quienes deben encargarse no solo de adoptar las medidas preventivas y correctivas de SUDS, sino que además, tienen la responsabilidad de velar porque dichas medidas se cumplan de acuerdo a lo establecido en los soportes de planificación. Por su parte, la ciudad de Bogotá cuenta con un importante espacio de oportunidad, que radica en el 11.2% del suelo urbano susceptible de ser urbanizado, en donde se puede regular desde la planificación el ordenamiento de tipologías que quieran ser implementadas y abordando alternativas que van desde las medidas no estructurales y las estructurales.

- **Recursos Económicos:**

En la Secretaría de Hacienda de Bogotá se expidió un documento en el cual se determinan los lineamientos de política para la programación presupuestal con vigencia del año 2014. En el que las metas generales van encaminadas principalmente a una ciudad que reduce la segregación y la discriminación, en donde el ser humano se encuentra en el centro de las preocupaciones de desarrollo, un territorio que enfrenta el cambio climático y se ordena alrededor del agua y finalmente, una Bogotá en defensa y fortalecimiento de lo público.

Como se puede observar, el interés de las entidades administrativas de la ciudad ya establece como prioritario el ordenamiento y uso del agua en la ciudad, un gran paso

para dar origen a propuestas que respondan a los requerimientos sociales, económicos, ambientales, sanitarios y físicos de Bogotá. (Secretaría de Hacienda Distrital, 2013).

6. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C

Con todas las herramientas analizadas hasta este momento, en donde se hizo una revisión de los adelantos a nivel internacional y local respecto a los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, el siguiente paso es la determinación de una propuesta general para la ciudad de Bogotá, realizando un análisis de viabilidad mediante la metodología del análisis Multicriterio, que consiste en la jerarquización de criterios y su calificación, a fin de obtener en orden de puntuación, una o varias alternativas que se ajusten a las condiciones locales de la ciudad de Bogotá. Se realizó la consolidación de una matriz que relaciona cada ciudad con los criterios de evaluación para cada una (Precipitación anual media, Clima, SUDS implementados, Ejecución-Implementación e Incentivos) disponible en el Anexo 1. Posteriormente se realizó la construcción de la Matriz Multicriterio (Ver Anexo 2), para seleccionar las tipologías que más se ajustan a las condiciones locales de Bogotá, teniendo en cuenta que todos los SUDS fueron evaluados respecto a Bogotá.

Aun cuando estos sistemas han sido acogidos a nivel mundial, y en el desarrollo de este documento se han resaltado los múltiples beneficios que acarrearán estos sistemas, es fundamental tener en cuenta que no se trata de herramientas perfectas pues los SUDS, de acuerdo con la revisión hecha hasta este punto necesariamente requieren de una inversión, de cambios en la manera en que se abordan las problemáticas urbanas relacionadas con la gestión del agua lluvia. No siempre se cuenta con espacios receptivos hacia este tipo de prácticas ya que el simple cambio de conciencia es un paso importante que no siempre se da

con facilidad. Tenemos importantes referencias acerca de la implementación de estos sistemas y su éxito, pero como se ha venido mencionando, la mayoría de ellos han sido implementados con mayor rigor en lugares del mundo en donde el acceso al agua es limitado. Este último punto hace interesante la evaluación de los SUDS para Bogotá D.C, siendo una de las ciudades más importantes que aunque se encuentra bajo una influencia climática distinta a la mayoría de ciudades estudiadas, tiene gran potencial en cuanto a la implementación de estos sistemas.

Criterios de Calificación - Ponderación en la Matriz Multicriterio:

La calificación de cada criterio se hará de 0 a 100 puntos, estando los valores cercanos a 100 más óptimos de acuerdo al criterio objeto de calificación.

A. **Precipitación en mm (Pp):** Se realizó el cálculo de intervalos para variable discreta con los valores de precipitación, así: De 450 mm a 650 mm se califica con 20 puntos, de 651 a 850 se califica con 40 puntos, de 851 a 1050 se califica con 60 puntos, de 1051 a 1250 se califica con 80 puntos y finalmente de 1251 a 1450 se califica con 100 puntos. Los valores de precipitación de cada ciudad se clasificaron dentro de cada intervalo y fueron calificados con el puntaje según el intervalo al que corresponden.

B. **Diseño, construcción – implementación y mantenimiento (DCIM):** Todas las tipologías fueron calificadas según su complejidad para ser diseñadas y construidas. Van desde las tipologías con menores requerimientos de diseño a las que requieren materiales adicionales a la cobertura vegetal, como materiales filtrantes acondicionados y sistemas hidráulicos más robustos. En ese orden, el puntaje correspondiente es el siguiente:

1. Zanjas y franjas filtrantes: 90 puntos
2. Depósitos de infiltración: 80 puntos

3. Cunetas verdes: 70 puntos
4. Jardines de Tormenta (Bioretención): 50 puntos
5. Estanques de retención: 40 puntos
6. Humedales artificiales: 40 puntos
7. Zanjas de infiltración: 30 puntos
8. Ecofachadas: 20 puntos
9. Pavimentos Permeables: 10 puntos

De acuerdo al orden como fueron clasificadas para calificar el diseño y la construcción, así mismo los costos de diseño, mantenimiento y construcción se elevan.

C. Ejecución e Incentivos (EI): Se tiene en cuenta las estrategias que pueden ser implementadas en corto, mediano y largo plazo para la ciudad de Bogotá, dando puntuación superior a aquellas en donde se limitan los espacios impermeables, se agilizan los procedimientos de otorgamiento de Licencias para construcción o incentivos de tipo económico en cuanto a la reducción de tarifas, por ejemplo. Se asigna menor puntuación a incentivos económicos donde se otorga dinero para la implementación de los SUDS, ya que para el caso local su implementación se vería restringida y limitada por el presupuesto local, aparte que demanda más demora en su implementación.

En la Tabla 15 se compiló la información más relevante respecto a cada ciudad, que representa una herramienta de soporte para la construcción de la matriz multicriterio. En esta tabla se definen los sistemas urbanos de drenaje sostenible implementados en cada una y su precipitación media anual.

Tabla 16 - Compilado de Información relevante por ciudades. Fuente: Autora

CIUDAD	SUDS IMPLEMENTADOS	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN mm (Pp)
Belo Horizonte	Zanjas de infiltración. Estanques de retención	1430
Melbourne	Jardines de tormenta	666
Sidney	Bioretención	884
Vancouver	Estanques de retención	1278
Oregon	Pavimentos permeables Zanjas de infiltración	823
Washington	Bioretención Pavimentos Permeables	1023
Chicago	Jardines de tormenta Zanjas filtrantes Pavimentos permeables	918
Berlín	Ecofachadas Sumideros y zanjas filtrantes Humedales Jardines de lluvia Pavimentos permeables	570
Madrid	Depósitos de retención/inf Pavimentos permeables.	450
Barcelona	Depósitos de retención/inf Pavimentos permeables	611
Londres	Depósitos de retención/inf Pavimentos permeables	621
Lyon	Depósitos de retención/inf Cunetas verdes Drenes/zanjas filtrantes	1348

Análisis de Viabilidad

De acuerdo con los resultados arrojados por la matriz multicriterio (Ver Tabla 17), entre las 9 tipologías implementadas obtuvieron mayor puntuación los pavimentos permeables con 1210 puntos, los depósitos de infiltración con 1190 y los jardines de tormenta/Bioretención con 1120 puntos. Estas tipologías sobresalieron con la mayor puntuación teniendo en cuenta criterios claves de adaptabilidad a la ciudad de Bogotá y cuyo análisis se realiza a continuación. Los pavimentos permeables han sido implementados en Oregon, Washington, Chicago, Berlín, Madrid, Barcelona y Londres. Los depósitos de infiltración fueron tomados de las experiencias en Melbourne, Sidney, Washington, Chicago y Berlín. La tercera tipología seleccionada con

posible adaptabilidad a la ciudad de Bogotá son los Jardines de tormenta, cuya implementación se ha realizado en Madrid, Barcelona, Londres y Lyon. De las tres tipologías la que seguramente se ajusta más a las condiciones de precipitación de Bogotá es la número 9, correspondiente a los Pavimentos permeables, ya que las ciudades en donde se han implementado cuentan con regímenes de precipitación similares a las de la ciudad capital, que oscilan entre los 570 mm de Berlín y los 1023 de Washington, siendo esta última la ciudad que más se aproxima a la precipitación media anual local de 1013 mm. De acuerdo a las experiencias de los depósitos de infiltración, la ciudad que más se asemeja a la precipitación de Bogotá es Lyon, con 1348 mm. Por su parte, los jardines de tormenta o bioretención también han sido implementados en Washington, Sidney y Chicago, con precipitaciones muy cercanas a la media anual de Bogotá. Con lo anterior es posible visualizar que las tipologías seleccionadas cumplen con el primer gran criterio de selección que es el de la precipitación. De todas las ciudades en las que se implementaron las tipologías preseleccionadas, la que más se asemeja en cuanto a precipitación es la ciudad de Washington. Si bien es una ciudad que se encuentra fuera de la influencia de la Zona de Confluencia Intertropical, su precipitación anual media es similar a la de Bogotá, aun cuando no cuente con comportamiento bimodal.

En cuanto a los aspectos hidráulicos, es de aclarar que van ligados al diseño, y por ende con la topografía y el área parcial o total de desarrollo urbano. Esto aduce inmediatamente a la evaluación del espacio disponible en la ciudad para implementar estos sistemas y algunos requerimientos técnicos. Si bien los tres sistemas son de aplicabilidad en espacio público, para el caso de los pavimentos permeables se necesitan espacios no tan amplios como parqueaderos y aceras de paso peatonal. Entre otras cosas se requiere de una tasa de infiltración mayor a 12 mm/h, una profundidad de nivel freático superior a 0.6 m y una relación máxima de área tributaria de 3:1 ha. Para los depósitos de infiltración, se requieren espacios públicos más amplios como parques o zonas verdes, en donde la tasa de infiltración requerida

es de 12 a 76 mm/h, la profundidad de nivel freático debe ser superior a 1.20 m y el área tributaria menor o igual a 5 m. Para los jardines de tormenta, sus condiciones hidráulicas no son tan exigentes. En Bogotá se cuenta con espacios verdes representativos susceptibles de adecuación, como el parque Simón Bolívar que en la actualidad cuenta con un lago que hace la función de pondaje y amortiguamiento de lluvias, el parque el Virrey que cuenta con estructura de canal revestido que haría las funciones de conducción en conjunto con las tipologías seleccionadas, y esto solo por mencionar el potencial de espacios que se tienen para la implementación de los sistemas SUDS en Bogotá.

Respecto al tratamiento de las aguas lluvias captadas, se obtuvo que las tipologías seleccionadas para Bogotá ofrecen tratamientos físicos, dentro de los cuales se destaca la filtración, biofiltración y precipitación de los sedimentos transportados por la escorrentía, así como la depuración de metales pesados de acuerdo con las especies de vegetación que se implementen por ejemplo, en los jardines de tormenta. Para el caso de los pavimentos permeables, como cuenta con varias capas de medio filtrante, se garantiza que el agua que permee este medio contendrá entre otras cosas, menor cantidad de sólidos suspendidos y otros contaminantes que puedan estar presentes.

Ahora bien, la gran debilidad para la implementación de estos sistemas es el tipo de suelos que predomina en la ciudad de Bogotá, correspondientes en su mayoría a arcillas y limos, que dificultan la permeabilidad del agua captada mediante estos sistemas. Este criterio se puede abordar con mayor detenimiento en investigaciones puntuales y posteriores a este estudio. Sin embargo, estos sistemas brindan la posibilidad de captar, tratar y conducir el agua de escorrentía, amortiguando los eventos de precipitación y conduciéndolos a cuerpos de agua superficiales para que desde allí, se complemente el ciclo urbano del agua. Aunque los suelos

no permitan una fácil infiltración, si pueden beneficiar la calidad de las aguas de la capital, diluyendo la carga que transporta por ejemplo, el río Bogotá.

Desde la perspectiva de los impactos ambientales, al implementar estos sistemas, Bogotá no sufriría efectos ambientales negativos, excepto las afectaciones a la población por el desarrollo de las obras. Más bien, fortalecerían el equilibrio ambiental de la ciudad mediante la gestión integral del agua lluvia y las escorrentías.

Por último, desde la perspectiva de la implementación, ejecución e incentivos, Chicago y Washington con una puntuación de 80 y 70 puntos respectivamente, son las mejores referencias en cuanto a medidas no estructurales o preventivas. Dichas medidas son importantes porque fortalecen la función de los SUDS desde la planeación. Adicionalmente, involucran a los diferentes actores del desarrollo urbano, que principalmente se constituyen por la población, el gobierno distrital y los entes de la construcción tanto pública como privada. Los incentivos que priman y que pueden ser aplicables a Bogotá es la reducción en los tiempos de otorgamiento de las Licencias de construcción para aquellos proyectos que involucren SUDS en su diseño y la reducción de las tarifas en servicio de alcantarillado para los predios que se decidan a implementar estos sistemas en su infraestructura ya existente. Con relación a lo anterior se observa el importante punto de oportunidad que se tiene respecto a la población y el desarrollo de la ciudad de Bogotá ya que del 25% del suelo urbano, un 88,9% ya se encuentra urbanizado y un 11,2% corresponde a suelo por desarrollar.

Cumpliendo con uno de los propósitos principales de esta investigación, las tres tipologías seleccionadas son de implementación en espacios públicos, y complementarias entre si, logrando aumentar la eficiencia de los sistemas existentes. No se trata de eliminar los sistemas convencionales sino que más bien, lo que se quiere es aumentar la eficiencia de dichos sistemas y aumentar su capacidad de respuesta evitando o reduciendo significativamente las escorrentías urbanas y con ello, las inundaciones. Una gestión estricta frente al funcionamiento

de las estructuras convencionales aumentando el rigor sancionatorio para casos como las conexiones erradas puede fortalecer las medidas de tipo estructural, ya que al final de cuentas, todo se logra a partir de una conciencia ambiental colectiva y si bien la responsabilidad primaria la tiene el gobierno distrital, como equipamientos públicos es deber de los capitalinos responder ante las exigencias que se hagan al respecto.

Finalmente respecto a la viabilidad de estas tipologías en la ciudad de Bogotá, se obtuvo que se ajustan a los criterios evaluados y por esa razón se puede afirmar que la selección realizada es objetiva dado que abarca todos los criterios propuestos desde el principio de la investigación y son de fácil adaptabilidad en Bogotá. Sin embargo se aclara que en este trabajo se aborda con criterios generales la selección de estos sistemas, teniendo en cuenta en primera medida las experiencias internacionales al respecto. En consecuencia, para definir las características específicas de diseño de cada una de las tres tipologías seleccionadas en este documento, habría lugar al desarrollo de fases posteriores en donde se concrete con detalle los parámetros específicos de cada sistema a implementar en la ciudad de Bogotá.

Tabla 17 - Matriz Multicriterio con Ponderación de Variables. Fuente: La Autora.

		Tipologías SUDS Implementadas																										
		1			2			3			4			5			6			7			8			9		
CRITERIOS	CIUDAD	Pp	DCI M	EI	Pp	DCI M	EI	Pp	DCI M	E I	Pp	DCI M	EI	Pp	DCI M	EI	Pp	DCI M	E I	Pp	DCI M	EI	Pp	DCI M	EI	Pp	DCI M	EI
Belo Horizonte		100			100			100			100			100	40	90	100			100	30	90	100			100		
Melbourne		40			40			40			40	50	30	40			40			40			40			40		
Sidney		60			60			60			60	50	30	60			60			60			60			60		
Vancouver		100			100			100			100			100	40	30	100			100			100			100		
Oregon		40			40			40			40			40			40			40	30	70	40			40	10	70
Washington		60			60			60			60	50	70	60			60			60			60			60	10	70
Chicago		60	90	80	60			60			60	50	80	60			60			60			60	20	80	60	10	80
Berlín		20	90	20	20			20			20	50	20	20			20	40	20	20			20	20	20	20	10	90
Madrid		20			20	80	80	20			20			20			20			20			20			20	10	80
Barcelona		20			20	80	80	20			20			20			20			20			20			20	10	80
Londres		20			20	80	30	20			20			20			20			20			20			20	10	30
Lyon		100	90	40	100	80	40	100	70	40	100			100			100			100			100			100		
Ponderado por Criterio	640	270	140	640	320	230	640	70	40	640	250	230	640	80	120	640	40	20	640	60	160	640	40	100	640	70	500	
Ponderado por Tipología	1050			1190			750			1120			840			700			860			780			1210			

Tipologías implementadas por ciudad	Tipologías seleccionadas	No aplica la calificación
-------------------------------------	--------------------------	---------------------------

7. CONCLUSIONES

Al realizar la identificación de ciudades con implementación de sistemas de SUDS alrededor del mundo, es posible observar que cada vez son más acogidos debido al gran aporte que tienen frente a la gestión de las aguas lluvias, las escorrentías urbanas y la gestión integral del agua en las ciudades. Cada ciudad seleccionada fue analizada detalladamente de acuerdo con el alcance planteado desde el inicio de la investigación, tomando como herramientas de selección los criterios que a su vez, fueron definidos previamente con el propósito de abarcar de la manera más general y técnica posible la información de las ciudades objeto de estudio.

Después de realizar el recorrido por cada ciudad, analizando en general su situación de localización, precipitación, diseño, implementación, ejecución, incentivos, entre otros, fue posible alimentar la herramienta de análisis y selección de las tipologías viables para Bogotá que corresponde a la matriz de análisis multicriterio. Toda la información contenida referente a las 12 ciudades seleccionadas fue comparada con la información de Bogotá D.C. de este modo, aparte de seleccionar las mejores opciones para implementar en Bogotá, se pudo observar adicionalmente la revalorización del entorno urbano de las ciudades como consecuencia de la posibilidad de recuperar zonas de frágil equilibrio, como son aquellas que tienen un déficit en recursos hídricos y que mediante la valorización de las aguas de lluvia fomentan la recuperación de acuíferos, humedales y en general el entorno natural de las ciudades.

De 9 tipologías preseleccionadas, se obtuvo que los pavimentos permeables, los depósitos de infiltración y los jardines de tormenta o bioretención son los sistemas que más se ajustan a las condiciones locales de Bogotá, de acuerdo con la puntuación obtenida en la matriz de

viabilidad. La topografía como parámetro de diseño no fue evaluado dentro de la matriz de multicriterio para la selección de las tipologías SUDS para Bogotá, debido a que si bien se obtuvo la información de pendientes máximas de diseño requeridas para la implementación de algunos de estos sistemas, no existe un valor representativo para la ciudad de Bogotá con el cual fuera posible realizar el paralelo y calificarlo de manera objetiva. Al respecto, se recomienda tener en cuenta las pendientes mencionadas en este documento, evaluar el terreno donde se desea incorporar estos sistemas y de esa forma establecer cuál es la tipología que junto con las otras variables, se ajusta más a las condiciones existentes para esa área específica.

Por otra parte, durante el desarrollo de todo el documento se aclaró que el propósito no es fomentar la sustitución de los sistemas convencionales existentes, toda vez que los SUDS pueden ser un complemento y nunca una competencia para estos sistemas. En general cada ciudad tuvo su punto en común con Bogotá, pero la que más condiciones aplicables ala ciudad de Bogotá tuvo fue Washington, ya que sus condiciones de precipitación son similares a las de Bogotá, cuenta con dos de las tres tipologías seleccionadas y finalmente, sus avances en cuanto a la ejecución de incentivos es replicable en Bogotá. Vale la pena resaltar que no es suficiente con que se determine y se analice la viabilidad de alternativas sostenibles como esta, Se busca fundamentalmente que entidades locales como Planeación Distrital, el IDU, la misma Alcaldía Local de Bogotá se apersonen de este tipo de estudios y se conviertan en actores clave que transformen la manera como se está planeando la ciudad y para esto, es trascendental la identificación de espacios de oportunidad como los que se reportan en este documento: por ejemplo, de la totalidad del suelo urbano en Bogotá, un 88.9% se encuentra urbanizado y un 11.2% es susceptible de ser urbanizado. Para lo que ya está intervenido, es posible contemplar la implementación progresiva de las medidas estructurales seleccionadas soportadas firmemente con lineamientos que podrían tomar formas de Ley, en donde se incentive la adopción de estos sistemas mediante medidas no estructurales, es decir, mediante

incentivos como la reducción del tiempo en el otorgamiento de las Licencias de Construcción y la reducción de las tarifas en el cobro de alcantarillado. Para los nuevos proyectos de construcción, la implementación de estos sistemas debería ser de carácter obligatorio, con el propósito que exista armonía con lo que se desea conseguir en la Bogotá construida hasta este momento.

Por último y no menos importante es el hecho que aunque se hable de prácticas sostenibles no está dicha la última palabra frente a estos sistemas, ya que están renovándose constantemente con el propósito de responder a las necesidades actuales y por otro lado, es claro que la concienciación real que lleva a la aplicación práctica no es fácil de lograr. Por esto el factor social es fundamental en todos los cambios que se propongan para enfrentar las problemáticas ambientales, siendo muy conscientes que el mayor impacto ambiental que tiene el entorno es la humanidad misma.

8. REFERENCIAS

Abellán, A. (16 de Mayo de 2014). Mantenimiento de las Cunetas Verdes. Obtenido de Drenaje Urbano Sostenible: <http://drenajeyurbanosostenible.org/cunetas-verdes-2/mantenimiento-de-las-cunetas-verdes/>

Alcaldía Mayor de Bogotá. (23 de Abril de 2014). Clima. Obtenido de Porta Bogotá: <http://www.bogota.gov.co/ciudad/clima>

Alta Consejería Distrital de TIC. (2014). Apropiación Social de las TIC. Obtenido de Alta Consejería Distrital de TIC: <http://tic.bogota.gov.co/mobile/apropiacion-social-de-las-tic/zonas-wi-fi-publico-en-bogota.html>

Álvarez Delgadillo, J. A., & Celedón Jaramillo, E. A. (2012). Evaluación de las capacidades hidráulicas y de retención de contaminantes de un modelo de trinchera de retención construida con una canastilla en resinas de Polipropileno (Aquacell) acoplada con capa filtrante. Tesis de Maestría concluida. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Maestría en Ingeniería Civil.

AmbiWeb GmbH. (2014). Datos climáticos mundiales. Obtenido de Climate-Data.org: <http://es.climate-data.org/>

Argos (2013). Concreto permeable: sistema integral para un desarrollo urbano sostenible. <http://www.foroargos.com/foro-2014/concreto-permeable-sistema-integral-para-un-desarrollo-urbano-sostenible-samuel-arango-colombia/>

Arroyave Rojas, J. A., Díaz Vélez, J. C., Vergara, D. M., & David Macías, N. (2011). Evaluación económica de la captación de agua lluvia como fuente alternativa de recurso hídrico en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Producción + Limpia, 6(1), 76-84.

Artieda, O. (2008). Papel del suelo en el ciclo hidrológico. Forum de Sostenibilidad, 2, 19-31.

ASCE, USEPA, WERF, FHWA, APWA, EWRI. (8 de Octubre de 2003). International Stormwater BMP Database. Obtenido de BMP Database: <http://bmpdatabase.org/index.htm>

Ávila, H. (2012). Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - Caso de Estudio: Ciudad de Barranquilla, Colombia. Revista de Ingeniería, 36, 54-59.

Ballén Suárez, J. A., Galarza García, M. Á., & Ortiz Mosquera, R. O. (2006). Historia de los Sistemas de Aprovechamiento de Agua Lluvia. VI SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Água. João Pessoa.

Benavides Ballesteros, H. O., & Ayala Poveda, L. (2010). Análisis Descriptivo de Variables Meteorológicas que influyen en la Calidad del Aire de los principales Centros Industriales del País. Bogotá: IDEAM.

Canada Mortgage and Housing Corporation - CMHC-SCHL. (2014). Sustainable Community Planning. Obtenido de <http://www.cmhc-schl.gc.ca/en/inpr/su/sucopl/index.cfm>

Castro Espinosa, M. L. (2011). Pavimentos Permeables como Alternativa de Drenaje Urbano. Tesis de Pregrado concluida. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Dpto. de Ingeniería Civil.

Castro Fresno, D., Rodríguez Bayón, J., Rodríguez Hernández, J., & Ballester Muñoz, F. (Mayo de 2005). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). *Interciencia*, 30(5), 255-260.

CEET. (2011). Las inundaciones en Bosa dejaron cerca de 2.000 damnificados. Obtenido de El Tiempo: http://www.eltiempo.com/Multimedia/galeria_fotos/bogot2/las-inundaciones-en-bosa-dejaron-cerca-de-2000-damnificados_10904928-5

Cortés Cortés, M. E., & Iglesias León, M. (2004). Generalidades sobre Metodología de la Investigación (Primera ed.). Ciudad del Carmen, Campeche, México: Universidad Autónoma del Carmen.

Cuadros Castillo, J. D. (2011). Análisis de Viabilidad de Suelo Estructural en los Sistemas de Drenaje Sostenible de Ciudades Compactas con Aplicación a la Transformación Urbanística de la Marina del Prat Vermell - Barcelona. Tesis de Pregado concluida. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Departament de Infraestructura del Transport i Territori.

Daley, R. (2003). A Guide to Storwater Best Management Practices - Chicago's Water Agenda.Chicago.

Delgado Parrado, C. C. (2001). Metodología para la Ordenación del Territorio Bajo el Prisma de Sostenibilidad (Estudio de su APLICación en la ciudad de Bogotá D.C.). Tesis de Doctorado concluida. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria MInera i Recursos Naturals.

Empresa Exterior. (22 de Abril de 2014). Hacer negocios en Colombia: Cuestiones clave para su empresa. Obtenido de Empresa Exterior: <http://empresaexterior.com/not/47723/hacer-negocios-en-colombia-cuestiones-clave-para-su-empresa/>

Estupiñán Perdomo, J. L., & Zapata García, H. O. (2010). Requerimientos de Infraestructura para el Aprovechamiento Sostenible del Agua Lluvia en el Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá. Tesis de Maestría concluida. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Maestría en Ingeniería Civil.

Galarza Molina, S. L. (2011). Desarrollo de una herramienta de análisis multicriterio para el soporte en el aprovechamiento de aguas lluvias e el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá. Tesis de Maestría concluida. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Maestría en Hidrosistemas.

González Rodríguez, M., Medina Ávila, M. C., & Spínola Calvo, A. M. (Marzo de 2012). Clima Ecuatorial. Obtenido de <http://titulaciongeografia-sevilla.es/web/contenidos/profesores/materiales/archivos/2012-04-16CLIMAECUATORIAL.pdf>

González, J. D., & Camacho, L. A. (2013). Desarrollo e implementación de un modelo integrado del sistema de alcantarillado - PTAR - HUMEDALES - RÍOS urbanos de la ciudad de Bogotá. En Sociedad y servicios ecosistémicos. Perspectivas desde la gestión del agua, las inundaciones y el saneamiento sostenible. (págs. 225-239). Cali: Universidad del Valle - Programa Editorial.

Graham, A., Day, J., Bray, B., & Mackenzie, S. (2012). Sustainable Drainage Systems - Maximising the potencial for people and wildlife - A guide for local authorities and developers.(RSBP, Ed.) Obtenido de http://www.rspb.org.uk/Images/SuDS_report_final_tcm9-338064.pdf

IDEAM. (2004). Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelito.Bogotá.

LANDCOM. (2009). Water Sensitive Urban Design - Book 3 (Case Studies).Parramatta: Landcom.

Lara Borrero, J. A., Torres Abello, A. E., Campos Pinilla, M. C., Duarte Castro, L., Echeverri Robayo, J. I., & Villegas González, P. A. (2007). Aprovechamiento del Agua Lluvia para Riego y Lavado de Zonas Duras y Fachadas en el Campus de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá). Ingeniería y Universidad, 11(2), 193-202.

Lobo-Guerrero Uscátegui, A. (1992). Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana. Bogotá: Sociedad Colombiana de Ingenieros - Sociedad Colombiana de Geotécnia.

Madison's Urban and Regional Planning Department. (12 de Junio de 2010). EcoPlanIT Madison. Obtenido de Urban and Regional Planning: http://urpl.wisc.edu/ecoplan/content/lit_stormwater.pdf

Martínez Soriano, L. (2012). Estrategias Integradas para la Gestión Sostenible de aguas de Lluvia en Áreas Metropolitanas. CONAMA 2012 - Congreso Nacional del Medio Ambiente. Madrid: Fundación Nueva Cultura del Agua.

Molina León, M. P., Gutiérrez, L., & Salazar, J. (2011). Documento Técnico de Soporte DTS - Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) para el Plan de Ordenamiento Zonal Norte POZN. Bogotá: Secretaría Distrital de Ambiente.

Montaña Duque, F. (2010). Selección de Tecnología para la Recolección y Transporte de Aguas Lluvias y Aguas Residuales en Áreas Urbanas. Tesis de Pregrado concluida. Santiago de Cali: Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente, Programa de Ingeniería Sanitaria.

Morelli Tucci, C. E. (2006). Gestión de Inundaciones Urbanas. Porto Alegre: Organización Meteorológica Mundial.

Morrison, P. J. (2008). Creating a "waterways city" by adressing municipal commitment and capacity: The story of melbourne continues. 11th International Conference on Urban Drainage. Edimburgo.

Nascimiento, N., von Sperling, M., Vieira, M., Silva, A., Seidl, M., & de Castro Vieira, P. (2008). Urban Stormwater Management Projects in Belo Horizonte. 3rd SWITCH Scientific Meeting.Belo Horizonte: SWITCH.

NILSA. (2010). Ponencias I Jornada de Drenaje Sostenible. I Jornada de Drenaje Sostenible. Navarra: NILSA.

Perales Momparler, S., & Andrés-Doménech, I. (2007). Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible: Una Alternativa a la Gestión del Agua de Lluvia. V Congreso Nacional de la Ingeniería Civil - Desarrollo y Sostenibilidad en el marco de la Ingeniería. Sevilla: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Prieto Leache, I. (2010). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Gestión del Agua y Ciudad. En E. i. DINA-MAR, La Gestión de la Recarga Artificial de Acuíferos en el Marco del Desarrollo Sostenible. Desarrollo Tecnológico. (págs. 331-349). Madrid: GRAFINAT.

PUCV. (21 de Octubre de 2013). Grupo de Geotecnia. Obtenido de Escuela de Ingeniería en Construcción - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso: http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/05_terzaghi_3.pdf

Radio Santa Fe. (28 de Agosto de 2011). Granizada y tormenta eléctrica provoca caída de árboles en el norte. Obtenido de Emisora Radio Santa Fe 1070 am: <http://www.radiosantafe.com/2011/08/28/granizada-y-tormenta-electrica-provoca-caida-de-arboles-en-el-norte/>

Rodríguez Mateus, H. J., & Díaz-Granados Ortiz, M. A. (2001). Sistemas Integrados de Drenaje Urbano. Tesis de Maestría concluida. Bogotá: Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Dpto. de Ingeniería Civil y Ambiental.

Sampieri Hernández, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). Metodología de la Investigación (Quinta ed.). México D.F.: McGraw-Hill.

Sánchez Castaño, A. M. (2010). Sistema de Filtración para Tratamiento de Aguas Lluvias. Tesis de Pregrado concluida. Pereira: Universidad Católica Popular de Risaralda, Facultad de Arquitectura y Diseño, Programa de Diseño Industrial.

Sánchez Pachón, C. (2010). Gestión Sostenible del Agua en el Desarrollo Urbano (Primera ed.). Buenos Aires: FODECO.

Secretaría de Hacienda. (s.f.). Clasificación y tipos de suelo. Extensión y tipo de suelo de Bogotá. Obtenido de Red Bogotá: <http://institutodeestudiosurbanos.info/endatos/0100/0110/0114-suelo/index.htm>

Secretaría de Hacienda Distrital. (22 de Marzo de 2013). Circular DDP - 09 de 2013. Obtenido de http://impuestos.shd.gov.co/portal/page/portal/portal_internet_sdh/presupuesto/generalidad_pre/Lineamientos_Vigencia_2014.pdf

Secretaría Distrital de Ambiente. (2014). Precipitación Anual - PA. Obtenido de Observatorio Ambiental de Bogotá: <http://oab.ambientebogota.gov.co/index.shtml?s=I&id=156&v=I>

Secretaría Distrital de Planeación. (2012). Documento Técnico Soporte de la Política Pública de Construcción Sostenible para Bogotá D.C. Bogotá: Secretaría Distrital de Planeación, Subsecretaría de Planeación Territorial.

Semana.com. (9 de Diciembre de 2011). Bogotá busca bomba de extracción petrolera para disminuir grandes inundaciones. Obtenido de Semana.com: <http://m.semana.com/nacion/articulo/bogota-busca-bomba-extraccion-petrolera-para-disminuir-grandes-inundaciones/250552-3>

Soluciones Hidropluviales. (2013). Captación en América. Obtenido de Soluciones Hidropluviales: <http://hidropluviales.com/?p=604>

Sommer, H. (2008). Storm Water Management in Germany. International Workshop on Ecological Technologies. Taipei: Institute of Water Resources Management, Hydrology and Agricultural Hydraulic Engineering (WAWI).

SDUS (2012) Factores físicos. Obtenido de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible <http://sdus.webnode.es/sdus/criterios-de-dise%C3%B1o/factores-a-considerar-en-la-seleccion-de-los-suds-cedex-/factores-fisicos/>

Torres, A., Méndez-Fajardo, S., Lara-Borrero, J. A., Estupiñán Perdomo, J. L., Zapata García, H. O., & Torres Murillo, Ó. M. (2012). Hacia equipamientos urbanos sostenibles: aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá. Cuadernos de Vivienda y Urbanismo, 5(9), 121-141.

TUCCI, C. E. (2007). Gestión de Inundaciones Urbanas. Porto Alegre.

Water Canada. (21 de Diciembre de 2009). Sustainable Stormwater Management. Obtenido de Water Canada: <http://watercanada.net/2009/sustainable-stormwater-management/>

Wikimedia Commons. (13 de Febrero de 2007). File:World map torrid.svg. Obtenido de Wikimedia Commons: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:World_map_torrid.svg