

DOI: 10.24850/j-tyca-2019-05-11

Artículos

Techos verdes para la gestión integral del agua: caso de estudio Chapinero, Colombia

Green roofs for comprehensive water management: Case study in Chapinero, Colombia

Oscar Contreras-Bejarano¹

Paula Andrea Villegas-González²

¹Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia,
ocontreras25@ucatolica.edu.co

²Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia,
pavillegas@ucatolica.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-9331-8979>

Autor para correspondencia: Oscar Contreras Bejarano,
ocontreras25@ucatolica.edu.co

Resumen

La ciudad de Bogotá, Colombia, se ha visto inmersa en problemas de inundaciones por empozamientos de agua pluvial y aumento tanto en la temperatura promedio como en la contaminación del aire. Las tecnologías verdes representan un mecanismo para la mitigación de tales problemas. Esta investigación analiza el comportamiento de la inundación urbana en el sector norte de la localidad de Chapinero, al sustituir las cubiertas existentes por techos verdes mediante modelación computacional. Asimismo, se construye un prototipo de techo verde en donde se analiza la calidad del agua de lluvia antes y después de filtrarse por diferentes sustratos (mezclas de tierra de jardín y cascarilla de arroz, humus, arena y/o aserrín), y plantas (*Sedum*, *Asparagus plumosus* y *Soleirolia*), con el fin de determinar los materiales con los cuales se controlen las condiciones de calidad de agua de lluvia una vez se filtre a través dichas cubiertas. El aumento en la cantidad de techos

verdes contribuye a la atenuación tanto de las inundaciones como de la capacidad de transporte de agua de lluvia de los ductos del alcantarillado pluvial de la zona. Por otro lado, los resultados del laboratorio indican que el aserrín es un 46% más eficiente que los demás materiales analizados en el control del pH de la precipitación. Las plantas *Sedum* demostraron una resistencia satisfactoria a un régimen frecuente de lluvia. El uso de tecnologías verdes no sólo disminuye la vulnerabilidad urbana frente a eventos de inundación sino también crea mecanismos para la gestión integral del recurso hídrico.

Palabras clave: calidad del agua pluvial, gestión integral del recurso hídrico, inundación, modelación, precipitación, simulación, techo verde, tecnologías verdes.

Abstract

The city of Bogotá, Colombia, has been immersed in flooding problems caused by rainwater, and issues from the increase in average temperature and air pollution. Green technologies are a mechanism that can mitigate these problems. This research analyzes the behavior of urban flooding in the northern sector of the Chapinero locality when replacing the existing roofs with green roofs through computer modeling. Additionally, it develops a green roof prototype, which analyzes the quality of rainwater before and after being filtered through different substrates (mixtures of garden soil, rice husk, humus, sand and/or sawdust) and plants (*Sedum*, *Asparagus plumosus* and *Soleirolia*), in order to determine the materials with which the conditions of rainwater quality are controlled once it filters through said roofs. The increase in the amount of green roofs contributes to mitigating flooding, as well as to the capacity of the area's storm drain pipes to transport rainwater. In turn, laboratory results indicate that sawdust is 46% more efficient than the other analyzed materials in controlling the rainwater's pH. *Sedum* plants demonstrated a satisfactory resistance to the conditions of frequent rainfall. Using green technologies not only decreases urban vulnerability to flooding, but also creates mechanisms for comprehensive water management.

Keywords: Rainwater quality, integral management of water resources, flood, modeling, precipitation, simulation, green roof, green technologies.

Recibido: 14/08/2017

Aceptado: 29/04/2019

Introducción

Bogotá, la capital de Colombia, es una ciudad en expansión, donde se espera un incremento poblacional cercano al 24% para el año 2020 (Secretaría de Hacienda, 2017); su desarrollo geográfico aumenta de manera acelerada (Peña-Guzmán, 2016). En el año 2015 se registraron 8.2 millones de metros cuadrados en proceso de construcción (Herrera, 2016), siendo éste uno de los sectores que más aporta a la economía de la ciudad. El aumento en la industria de la construcción se relaciona directamente con la capacidad de drenaje del agua de lluvia, dado el incremento de las superficies impermeables en la ciudad.

Actualmente localidades como Antonio Nariño, Chapinero, Engativá, Kennedy, Fontibón y Usaquén (Almanza, 2017) son vulnerables a inundaciones debido a la acumulación de basuras (DPAE, 2012) y posterior saturación de las tuberías del alcantarillado. Estos problemas son causados por el incremento del caudal de agua de lluvia que transportan los ductos (Granada & Secretaría Distrital de Ambiente, 2008), consecuencia de la expansión de las áreas impermeables en la ciudad, las cuales conducen la precipitación directamente al alcantarillado pluvial. En específico, en el barrio Fragua de la localidad de Antonio Nariño en Bogotá, 22 viviendas fueron afectadas con pérdidas de enseres y bienes domésticos (El Tiempo, 2015), asimismo se han presentado colapsos del tráfico que impiden el flujo hacia el sur de la ciudad (Radio Cadena Nacional, 2017), y el desplome de un muro de contención en una zona residencial en los Rosales, localidad de Chapinero (El Espectador, 2016). También se han reportado inundaciones en el sector del parque Simón Bolívar, en los barrios Las Ferias, La Granja, Barrios Unidos y la Avenida Boyacá (El Tiempo,

2016). Las afectaciones descritas evidencian que la sociedad no puede continuar a la espera de la intervención en la gestión del recurso hídrico (Bernal-Pedraza, 2010), de lo contrario, las consecuencias podrían empeorar.

La información que poseen algunos ciudadanos en temas relacionados con el agua, el medio ambiente y los problemas que repercuten en una ineficiente gestión de los recursos en Bogotá es limitada, de ahí la importancia de generar conciencia en el cuidado, con programas de ahorro o con sistemas automatizados que apoyen evitar su desperdicio (López, García, Gameros, & De la Rocha, 2015). En la ciudad de Mexicali, México, se espera que en un periodo de tres a cinco años se reduzca alrededor de 30% el suministro del recurso hídrico (López *et al.*, 2015). En las llanuras del norte de China, por ejemplo, los niveles freáticos están descendiendo; este recurso producía 25% de la cosecha de cereales de ese país (Fernández-Colón, 2009). Asimismo, en África del norte, el Ministerio de Ambiente de Egipto reconoció que vastas extensiones de la nortea zona del delta del Nilo, la mayor y más importante región agrícola de este país, ya sufre dos grandes consecuencias peligrosas: salinización e inundaciones (Kamal, 2016). En Italia, más de 50% de las muestras de calidad de agua de los ríos no alcanzan una buena calidad (Conte *et al.*, 2012). Estos estudios y la situación actual de Bogotá evidencian que la crisis no sólo se debe a la escasez que busca satisfacer las demandas sino a la deficiente gestión integral que incorpore el uso racional del recurso hídrico (Rivera & Aguila, 2015). Los hallazgos muestran que la incidencia de eventos como inundaciones y sequías será paulatinamente más frecuente en diferentes lugares del mundo.

En este orden de ideas, se encuentra que cada vez son más frecuentes las inundaciones urbanas relacionadas con la deficiencia en el mantenimiento de los sistemas de alcantarillado en las ciudades colombianas (Banco Mundial, 2012). De allí que esta investigación presente una alternativa al problema de inundación urbana en el ámbito del manejo integrado del recurso hídrico, a partir del análisis de un prototipo de techo verde para el manejo de las aguas lluvias. Una estrategia que se ha usado en los ámbitos mundial y nacional para el aprovechamiento del recurso hídrico es el manejo integral del agua pluvial. Este tipo de estrategias busca sobre todo la reducción de caudales por escorrentía, el control de la contaminación del agua de

lluvia, y la ampliación de la infraestructura pluvial (Peña-Guzmán, 2016).

Asimismo, la ciudad requiere de una disminución de la contaminación y la temperatura, factores que las tecnologías verdes están en capacidad de contrarrestar. Como caso de estudio se analiza la ciudad de Bogotá, que debido a las intensas lluvias, ha sufrido inundaciones en los últimos años (Niño-Fierro, 2012). Se analiza la eficiencia de esta tecnología en la zona norte de la localidad de Chapinero, donde este escenario se hace presente en épocas de lluvia. De igual forma, se propone la incorporación de nuevos mecanismos para el control de la calidad del agua pluvial, con el fin de reutilizar el recurso hídrico en actividades domésticas.

El desarrollo de tecnologías sustentables es propuesto a través del estudio de un prototipo, entendido como una fase real del diseño a través de la construcción y ejecución de pruebas experimentales (Kroes, 2012). Se espera que esta investigación contribuya a potencializar los beneficios de los techos verdes en pro de la sociedad, y que se considere como un ejemplo para ciudades que posean problemáticas, como las que presentan algunas comunidades de la ciudad de Bogotá.

El concepto de sostenibilidad es uno de los enfoques fundamentales de esta investigación, dado que es la orientación moderna de la gestión del agua (Martínez-Austria & Vargas-Hidalgo, 2016). Los techos verdes son propuestos como una tecnología sostenible, en la medida que tienen la capacidad de captar agua de lluvia, reduciendo el riesgo a inundaciones por empozamiento de agua pluvial. Por ejemplo en Auckland, Nueva Zelanda, se reportó una retención de 66% en un techo verde extensivo (Nawaz, McDonald, & Postoyko, 2015). El empleo del agua de lluvia en sustitución del agua potable para determinados usos (descarga de inodoros, riego, o lavadoras), puede ser tenida en cuenta como alternativa para la mejora de la eficiencia del uso de recursos hídricos (López-Patiño, Martínez-Solano, Fuertes-Miquel, & López-Jiménez, 2011).

Los techos verdes son una tecnología emergente en la ciudad. Estas cubiertas disminuyen la probabilidad de inundación (Oviedo & Torres, 2014), dado que su capacidad de retención de agua de lluvia reduce de modo paulatino la tasa de infiltración al alcantarillado pluvial, evitando la saturación de los ductos y posterior colmatación. El intercambio dióxido de carbono/oxígeno de la vegetación de un techo verde produce

suficiente oxígeno por un año para suministrar a una persona (Kravits, 2007). Asimismo, una superficie de 15 m x 15 m es suficiente para suplir de oxígeno a una familia de cuatro personas cada día (Psencik & Heller, 2012). Un caso exitoso para contrarrestar este problema está en Hong Kong, donde en un día soleado, un techo verde extensivo reduce la concentración de dióxido de carbono hasta en un 2% (Zielinski, Carlos, Paternina, & Marta, 2012). Evidentemente los techos verdes benefician a una ciudad con problemas de contaminación. Por otro lado, disminuyen la temperatura en zonas urbanas (Yan, 2011). Para la ciudad de Buenos Aires, por ejemplo, se pronostica un aumento de las temperaturas promedio máximas de 0.6 °C a más de 2 °C en el periodo 2020-2029 (Rosatto, Botta, Becerra, Tardito, & María, 2016); situaciones como ésta acrecientan la importancia de la implementación de nuevas tecnologías, como un mecanismo de mitigación de tal tipo de problemáticas.

Este documento inicia con el marco conceptual, el cual incluye las generalidades sobre los techos verdes; se contextualizan las temáticas relacionadas con los beneficios, la calidad del agua de lluvia, el impacto estructural en una edificación, el costo privado y público, y las certificaciones LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) que se pueden otorgar a sistemas con este tipo de cubiertas. Después se presentan los resultados del trabajo con la comunidad, en donde se realizó una encuesta a los habitantes de la zona de estudio en septiembre de 2015. Allí se hace evidente la importancia de implementar los techos verdes como alternativa a las inundaciones del sector. Mediante la implementación del *software SWMM (Storm Water Management Model)*, se modelan las características de las cubiertas que poseen actualmente las edificaciones de la zona; los pozos de inspección y las tuberías pertenecientes al alcantarillado pluvial del área, y la precipitación característica de este lugar. Se sustituyen cubiertas tradicionales por los techos verdes, con el fin de comparar el comportamiento de la inundación con los dos tipos de cubiertas. La implementación de esta tecnología constituye una nueva forma para la gestión tradicional del agua de lluvia, la cual contribuye a “lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles” (Organización de las Naciones Unidas, 2015). Los resultados de estos modelos son analizados y sirven como referencia para la construcción de un prototipo de techo verde con diferentes tipos de plantas y combinaciones de sustratos. Este diseño

sirve como base para comparar la calidad tanto del agua de lluvia como del agua filtrada por el techo verde para su reutilización en actividades domésticas.

¿Qué son los techos verdes?

Un techo verde es un sistema constructivo que permite de manera sostenible mantener un paisaje vegetal sobre la cubierta de un inmueble (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011). Las tecnologías de techos verdes varían sus características en función de las plantas y el sustrato implementado. Por lo general se conforman de manera ascendente por una capa de impermeabilización, cuyo objetivo es impedir el contacto entre el agua y el soporte del techo, pues se podrían desarrollar patógenos que afecten la integridad estructural de la edificación; la capa del drenaje tiene la función de conducir el agua de lluvia excedente e impedir el paso de material propio del medio de crecimiento de la cubierta; la capa del filtro evita que las raíces alcancen la estructura del techo; en cuanto al sustrato, es el medio de crecimiento de la vegetación, sirve como material nutriente, almacena el agua y debe poseer suficiente volumen de aire en poros para ofrecer a las raíces la posibilidad de anclaje (Minke, 2004). Por último, la capa vegetal proporciona una cobertura viva (ver Figura 1), y dadas las diversas condiciones climáticas y químicas a las que están sujetas las plantas del techo (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011), se deben analizar las características de la vegetación, con el fin de garantizar la subsistencia y sostenibilidad del techo.

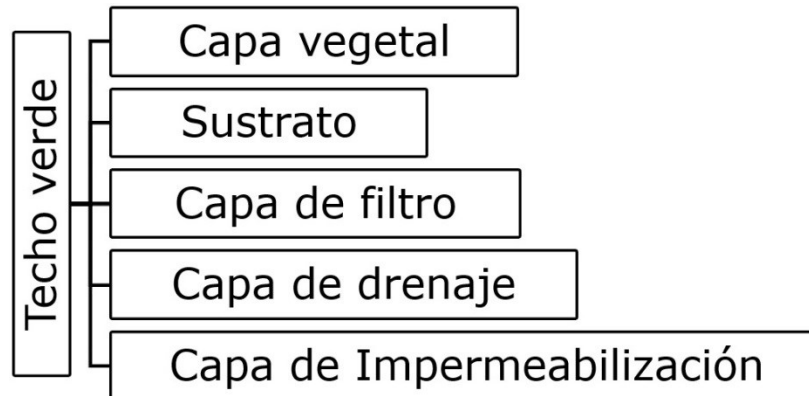


Figura 1. Composición de un techo verde.

Plantar vegetación en la cubierta no sólo puede embellecer el medio ambiente (Sun, Lin, Sung, Ou, & Lu, 2012) sino también contribuir al desarrollo de los beneficios propios de los techos verdes. Investigaciones previas han demostrado el potencial de algunos elementos en mejorar las condiciones de estas cubiertas, con el fin de potencializar sus efectos, por ejemplo, la utilización de musgos puede mejorar el rendimiento de gestión de aguas pluviales y la temperatura de los techos verdes (Anderson, Lambrinos, & Schroll, 2010).

La experimentación con diferentes sustratos de techos verdes ha llegado a conclusiones similares: cuanto más lenta es la tasa de escorrentía más altas son las concentraciones de todos los componentes estudiados en el agua de escorrentía de la cubierta verde (Teemusk & Mander, 2011). De igual forma, la calidad de la escorrentía proveniente de los techos verdes depende de las diferencias en la estructura de las capas del techo (Hashemi, Mahmud, & Ashraf, 2015).

Hasta el momento se han nombrado los beneficios de los techos verdes, los cuales en la actualidad continúan siendo objeto de estudio. La implementación de esta tecnología está ligada con las condiciones de las edificaciones, donde la estructura juega un papel importante en las limitaciones de instalación de un techo verde; el peso de los sustratos y la siembra, por ejemplo, deben considerarse en relación con la capacidad de carga de la cubierta (Wilkinson *et al.*, 2015). En caso de que la edificación no cumpla con los requisitos estructurales para resistir la carga, se deben realizar adecuaciones para su implementación. La inclinación de la cubierta es un factor sustancial, pues una pendiente

pronunciada en zonas de precipitaciones fuertes podría conllevar a erosiones y daños en la vegetación; asimismo, la carga del viento y la radiación solar influyen en la evaporación y tienen por lo tanto relación en la elección de las plantas (Minke, 2004).

Cabe agregar que la implementación de estas cubiertas es recomendable realizarla en todos los inmuebles de una comunidad que sufra los problemas descritos anteriormente, dado que el costo adicional de un techo verde es un costo privado, y por otro lado muchos de sus beneficios son públicos y externos a la construcción propia (Blackhurst, Hendrickson, Asce, Matthews, & Asce, 2010). Por lo tanto, se requiere de la cooperación de una comunidad, con el fin de lograr que tecnologías como los techos verdes se adecuen al entorno y cumplan sus funciones. En Suiza, toda nueva construcción requiere por ley una retribución en espacios verdes (Kravits, 2007). En Bogotá, toda construcción pública nueva debe contemplar en su diseño una tecnología sostenible (Consejo de Bogotá, 2009).

Las edificaciones que realicen una gestión apropiada del agua, consuman una menor cantidad de energía y reduzcan emisiones de gases de efecto invernadero podrán recibir la certificación LEED. Tales estrategias sustentables están cambiando la forma en la que se piensa cómo se planifican los edificios y las comunidades (Green Building Consul, 2017), lo que contribuye al fortalecimiento de las tecnologías verdes que contrarrestan los problemas ambientales que se están viviendo actualmente en todo el mundo. Por ejemplo, Alemania respecto al mundo es líder en la implementación de techos verdes: 10% de los edificios usa esta tecnología (Saadatian *et al.*, 2013). El incremento del valor comercial es un factor determinante en la incorporación de techos verdes. Tokio ha comenzado a instalar cubiertas verdes para incrementar el valor del metro cuadrado en los edificios (Zielinski *et al.*, 2012), al igual que EUA, país que registra un aumento en el valor de las edificaciones con techos verdes entre un 6 y 15% (Johnston & Newton, 2004). Por otra parte, desde el sector privado, se puede resaltar el edificio Novartis en Bogotá, el cual fue uno de los pioneros en el empleo de la cubierta verde como emblema ecológico en la incentivación de este modelo (Hoyos-Giraldo, Acevedo Correa, & Álvarez Cuadrado, 2014).

Propósito, alcance y limitaciones

Esta investigación pretende investigar un mecanismo que contribuya a la reducción paulatina de eventos de inundación urbana y aporte al manejo integral del recurso hídrico en la zona norte de la localidad de Chapinero a través de dos estrategias constituidas por modelación computacional, en donde se espera analizar la variación de la inundación urbana con la implementación de techos verdes; y por modelación física, con la cual se pretende analizar el comportamiento de las características de calidad y retención de agua de lluvia con diferentes alternativas de techos verdes.

Este trabajo es un estudio inicial en el cual se esperan alcanzar resultados relacionados con el comportamiento de la inundación en un sector susceptible a esta problemática urbana en la ciudad de Bogotá, con el fin de observar el impacto de una tecnología sostenible como los techos verdes sobre los problemas de inundación en una comunidad. Asimismo, se espera evidenciar variaciones en las condiciones de calidad de agua de lluvia y capacidad de retención del sustrato, con el fin de proponer una alternativa que contribuya a la gestión integral del recurso hídrico.

Por otro lado, la precisión del modelo se ve afectada a causa de la carencia de información exacta respecto a fugas, conexiones erradas en el sistema de alcantarillado pluvial, o problemas de basura. Durante la época en la que se realizaron las simulaciones de precipitación no se presentaron lluvias en la zona donde se encuentra el laboratorio en el que se desarrolló el proceso de experimentación, por tal motivo, el agua utilizada para las simulaciones sufrió un incremento en su acidez.

Caracterización de la zona de estudio

En diferentes zonas de la ciudad de Bogotá se presentan problemas de inundación urbana, originadas por la saturación de los ductos del alcantarillado o por el desbordamiento de canales o ríos aledaños. Los techos verdes tienen la capacidad de contrarrestar dichos empozamientos de agua. Al analizar los sectores que presentan inundaciones en la ciudad de Bogotá mediante un mapa de manchas de inundación elaborado por el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) en 2015, se seleccionó la zona comprendida entre las calles 94 y 106, la Escuela Militar Nueva Granada y la Avenida Carrera 15.

Los parques y zonas verdes actúan como filtro natural de agua de lluvia, tal es el principio que se quiere implementar con la instalación de los techos verdes. En esta área de la ciudad escasean los parques y las zonas verdes, ello implica la presencia de superficies impermeables que conducen la escorrentía al alcantarillado pluvial. En la **iError! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la ubicación de la zona de afectación escogida para el análisis, comprendida de derecha a izquierda por Colombia, Bogotá, la localidad de Chapinero y el norte de la localidad de Chapinero.

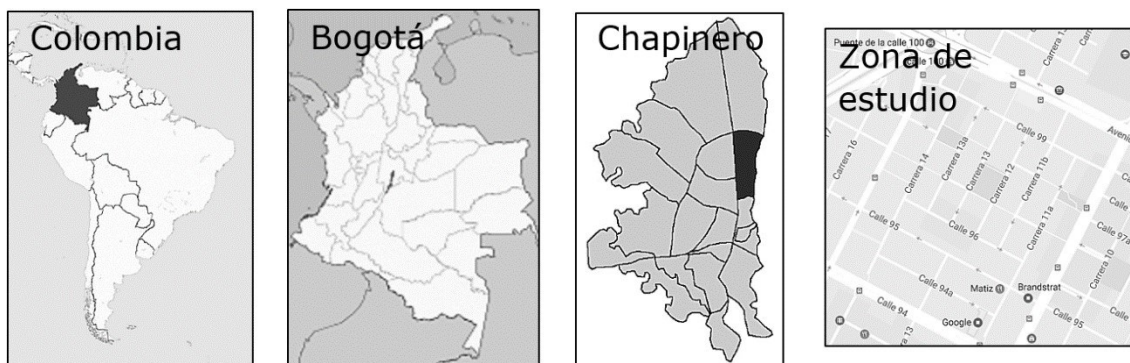


Figura 2. Localización de la zona de afectación.

Los días 12 y 13 de septiembre de 2015 se realizó una encuesta a 40 ciudadanos del sector, para conocer la información que poseen los ciudadanos encuestados respecto a las inundaciones que se presentan en la localidad y los mecanismos de mitigación del problema. Se plantean preguntas como las siguientes: ¿qué tan frecuente se presentan inundaciones por lluvias en este sector?, ¿sabe usted qué es

un techo verde?, o ¿estaría dispuesto a instalar un techo verde en su propiedad, para contrarrestar los niveles de inundación y aumentar la calidad ambiental de Bogotá?

Los residentes del sector reconocen que las inundaciones se generan en épocas de lluvia, usualmente entre los meses de octubre, noviembre y diciembre; desconocen las causas de la inundación y también cualquier mecanismo sostenible para contrarrestar este problema. Se explica a los ciudadanos encuestados tanto los beneficios como las desventajas de la implementación de un techo verde, quienes se vieron entusiastas con la idea de la implementación de esta tecnología en la zona. La Figura 3 muestra los resultados de la séptima pregunta de la encuesta, en donde la mayoría de los residentes estaría dispuesto a instalar un techo verde en su propiedad.

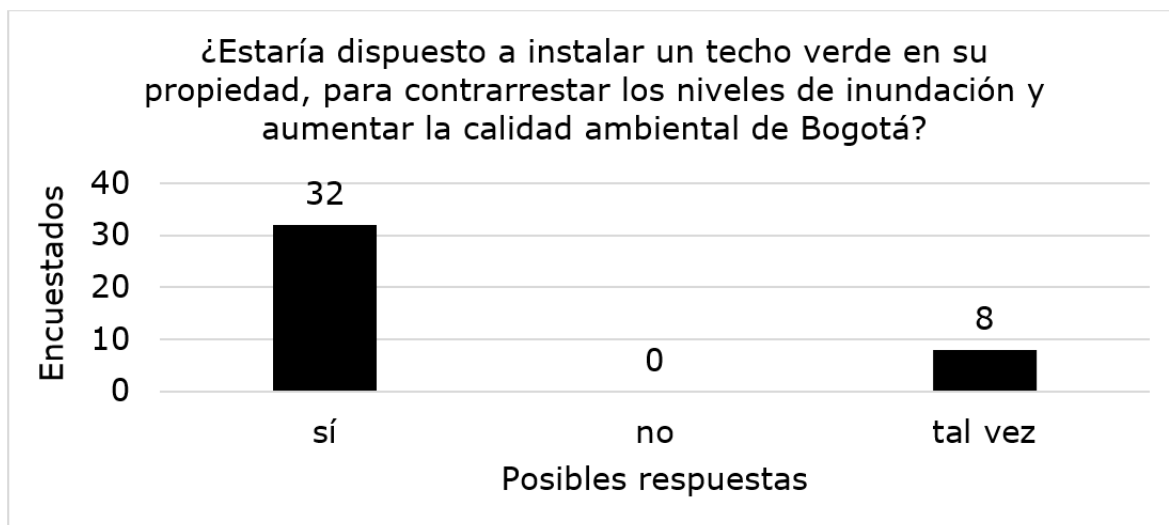


Figura 3. Pregunta de interés en la encuesta a la comunidad.

Se evidencia el interés de la comunidad por solucionar el problema de las inundaciones en el sector mediante tecnologías sustentables, las cuales no sólo contrarrestan los niveles de inundación, sino también aportan al mejoramiento del medio ambiente, y sirven como ejemplo a otras comunidades que posean problemas similares. La ciudad de Bogotá registró magnitudes de 877, 506.5 y 872.8 mm de precipitación para los años 2014, 2015 y 2016, respectivamente (Observatorio

Ambiental de Bogotá, 2016), siendo los últimos meses del año, los que más aportan a estos datos.

Metodología

Esta investigación consta de dos fases. En la primera se presenta el modelo conceptual de la problemática en estudio, en donde se evalúan las condiciones de inundación de la ciudad de Bogotá, situando la zona de afectación propicia para la instalación de techos verdes. Posteriormente se describe el modelo computacional llevado a cabo en el *software SWMM*, a partir de la modelación de cada elemento (precipitación, techos convencionales, techos verdes y sistema de alcantarillado pluvial) y la relación entre ellos (precipitación-techo, relación entre techos contiguos y techo-sistema de alcantarillado pluvial), consolidando la primera fase de la investigación. La simulación mediante un modelo físico constituye la segunda fase, en donde se analizan las condiciones de retención y calidad del agua de lluvia antes y después de ser filtrada por diferentes composiciones de techos verdes y un filtro de arena.

Modelo conceptual

La Figura 4 explica el comportamiento de la lluvia en presencia de cubiertas tradicionales. En la imagen de la izquierda se presenta la precipitación (a), que genera una tasa elevada de escorrentía a través de las cubiertas tradicionales (b); este caudal es conducido hasta los sumideros de las calles, y finalmente enviado a los ductos del alcantarillado pluvial, puesto que las tuberías no tienen la capacidad de

drenar dicho caudal, el sistema colmata y se desarrolla una inundación (d). Por otro lado, la imagen derecha muestra el comportamiento de la precipitación al infiltrarse a través de un techo verde (c); éste reduce la tasa de escorrentía del agua de lluvia, aliviando la capacidad de transporte del líquido a través de las tuberías, previniendo la saturación de los ductos, posterior inundación, y almacenando el recurso hídrico en reservorios (e) internos de la edificación.

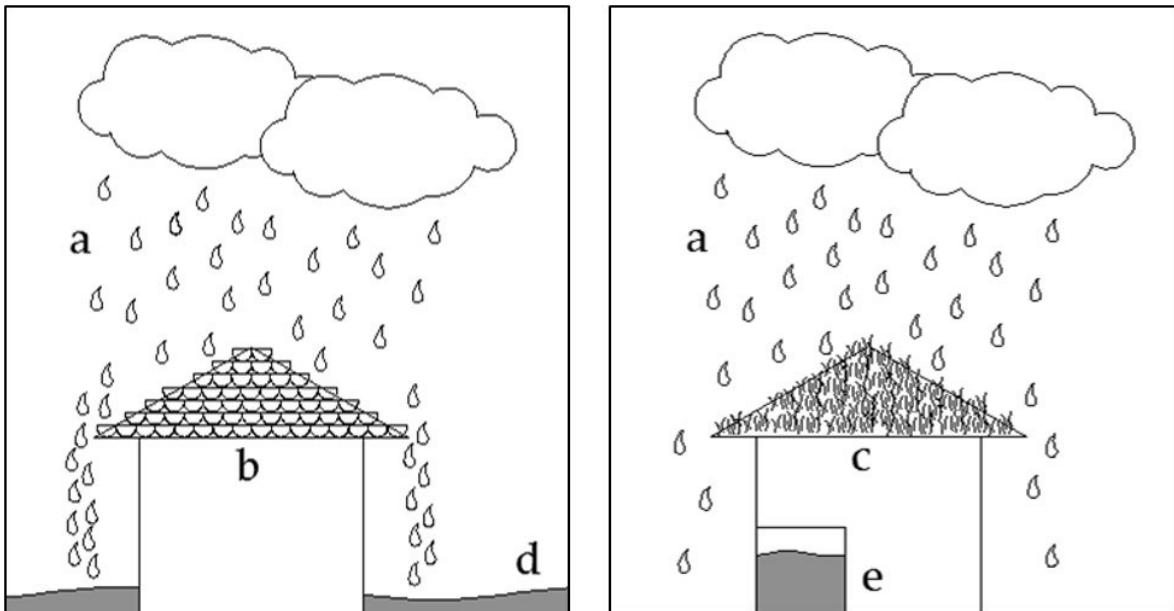


Figura 4. Comportamiento de la inundación con techos tradicionales (izquierda) y techos verdes (derecha): a) precipitación; b) techo tradicional; c) techo verde; d) inundación; e) reservorio de agua de lluvia.

Modelo computacional

La precipitación llega a las cubiertas de las edificaciones por acción de la gravedad. La cantidad de milímetros de precipitación se estima a través

de la curva de intensidad, frecuencia y duración (IDF) de la zona en estudio. Mediante la ecuación (1) se calcula la magnitud de intensidad de la lluvia con diferentes duraciones (1, 2, 3, 4 y 5 horas) y periodos de retorno (3, 5, 10, 25, 50 y 100 años):

$$i = C_1(d + X_0)^{C_2} \quad (1)$$

En donde i es la intensidad en milímetros por hora; C_1 y C_2 , los parámetros de la ecuación de mejor ajuste por el método de los mínimos cuadrados; X_0 , la duración en minutos; d , la duración de la precipitación en minutos. Tanto C_1 , C_2 , y X_0 son valores extraídos de los coeficientes de las curvas IDF calculados por el Instituto de Hidrología Aplicada de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Posteriormente se construye un hietograma con la duración de la precipitación y la intensidad correspondiente.

Tanto los techos convencionales como los techos verdes se modelan como subcuencas, con el fin de asignar a cada cubierta un tratamiento para la precipitación, ya sea en forma de escorrentía (techo convencional) o infiltración (techo verde). La modelación de estos elementos depende del área, la pendiente y el ancho del techo, el cual es obtenido mediante análisis de mapas con la herramienta *Google Earth*, entendiendo al ancho como la dimensión característica del flujo debido a la escorrentía. La diferencia que existe entre la modelación del techo convencional y el techo verde radica en el área impermeable y la infiltración; para el techo convencional, el área impermeable es total y se considera un coeficiente de Manning de 0.012 (Environmental Protection Agency, Water Supply and Water Resources Division, Efr, & M. Inc., 2004) correspondiente a materiales relativamente lisos y no se supone infiltración. Por otro lado, para el techo verde, no se plantea área impermeable, dado que se supone la instalación del techo verde en toda el área disponible y se considera un coeficiente de n Manning de 0.24 (Environmental Protection Agency *et al.*, 2004), correspondiente a una capa vegetal densa; por último se asignan valores característicos del sustrato respecto a la altura de succión, conductividad y déficit inicial, para considerar la acción de la infiltración de la precipitación en el techo verde.

Para la modelación del sistema de alcantarillado pluvial se siguieron los alineamientos de longitudes, cotas y materiales de los planos otorgados por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). El alcantarillado de la zona se compone tanto de tuberías en PVC como de un tramo box coulvert. También se asignan características relacionadas con forma (circular, box coulvert), profundidad, longitud y rugosidad (PVC, concreto). En la unión de cada ducto se constituye un pozo de inspección (nudo), cuyo objetivo es recibir el agua de lluvia proveniente de las cubiertas.

La Tabla 1 resume las características de las cubiertas, el alcantarillado y la precipitación implementados para la modelación en SWMM.

Tabla 1. Elementos de la modelación en SWMM.

Modelación en SWMM					
Conjuntos	Cubiertas		Sistema de alcantarillado		Lluvia
Subconjuntos	Techos verdes	Techos convencionales	Tuberías	Box coulvert	Pluviómetro
Características	Descarga Área Pendiente Ancho Coef. permeable Flujo entre áreas Escorrentía	Descarga Área Pendiente Ancho Coef. impermeable Flujo entre áreas Infiltración	Forma Profundidad Longitud Coef. Manning	Forma Profundidad Longitud Coef. Manning	Intensidad

A continuación se describe la relación existente entre las cubiertas, el sistema de alcantarillado y la lluvia. La Figura 5 presenta una esquematización del modelo realizado; en primera instancia, el pluviómetro es la idealización del proceso de precipitación. Dicho elemento asigna el hietograma que se mencionó anteriormente a cada una de las áreas modeladas, para simular el contacto entre la lluvia y la superficie de los techos de la zona en estudio. Una vez la precipitación está en las áreas, escurre (caso: techo convencional) o se infiltra (caso: techo verde) en la cubierta. Se realizan dos modelaciones: la primera sin considerar techos verdes y la segunda teniéndolos en cuenta. Cada

área que representa el techo está conectada con un pozo de inspección a través de una línea de descarga, la cual se encarga de conducir la precipitación de la cubierta al pozo. Después el agua de lluvia se transporta por gravedad a través de los ductos hasta los puntos de vertido al final de las líneas del sistema de alcantarillado.

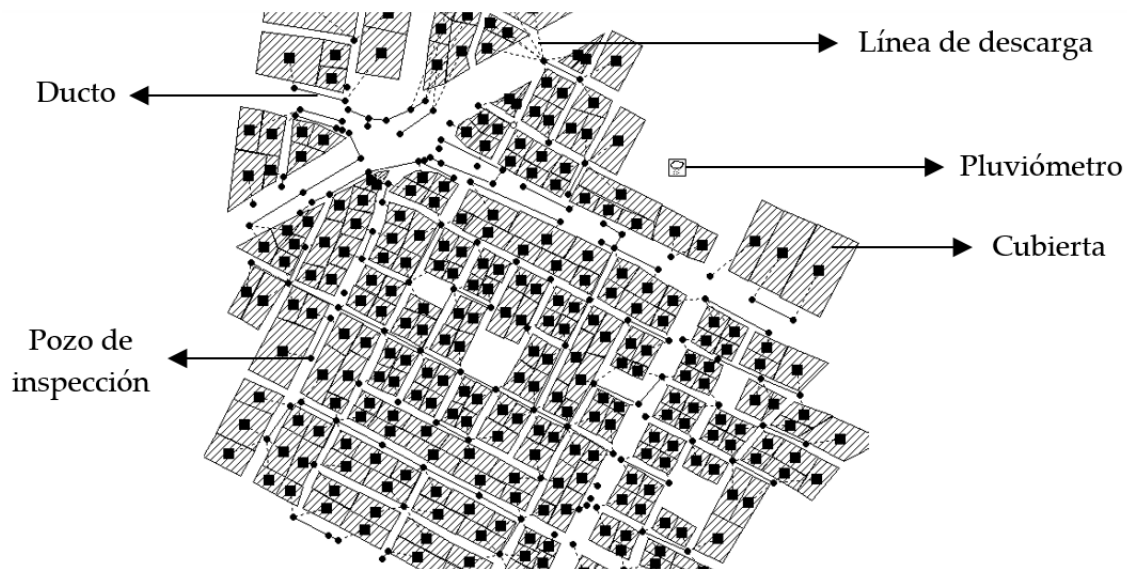


Figura 5. Relación entre los elementos del modelo computacional.

Prototipo de techo verde

El prototipo está constituido por un geotextil no tejido de polipropileno en la capa de drenaje del techo. Como material alternativo del sustrato se implementa humus, cascarilla de arroz, aserrín y arena. En cuanto a la capa vegetal, se implementan las especies *Sedum*, *Asparagus plumosus* y *Soleirolia*. Además, se diseña un simulador de lluvia, el cual proporciona agua pluvial al prototipo, extrayendo el líquido de un tanque enterrado mediante una conexión con una bomba centrífuga. De igual forma, se diseña un filtro de arena, por el cual pasa el agua de lluvia una vez es filtrada por el sustrato del techo verde. La Figura 6 muestra

una vista superior del prototipo con la numeración dada, con el fin de comprender la ubicación de cada una de las combinaciones de plantas y sustratos que se presentan en la Tabla 2.

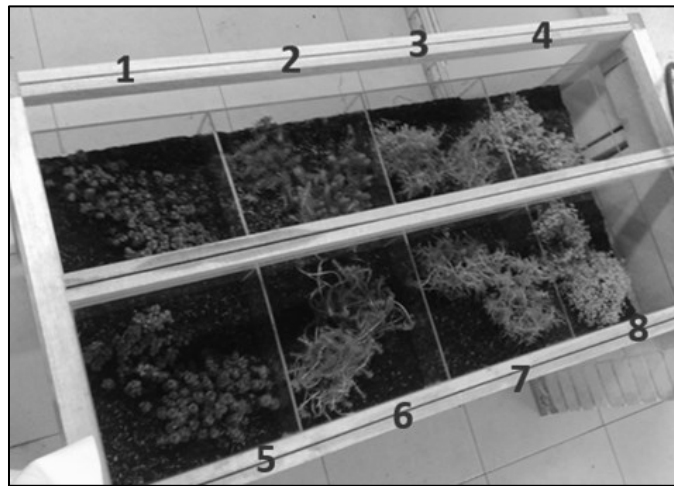


Figura 6. Asignación numérica de los cajones del prototipo de techo verde.

Tabla 1. Composición de los cajones del prototipo de techo verde.

Cajón	1	2	3	4
Planta	<i>Sedum 1</i>	<i>Sedum 2</i>	<i>Asparagus plumosus</i>	<i>Soleirolia</i>
Material alternativo	Humus (10%)	Cascarilla de arroz (10%)	Aserrín (10%)	Arena (10%)
Cajón	5	6	7	8
Planta	<i>Sedum 1</i>	<i>Sedum 2</i>	<i>Asparagus plumosus</i>	<i>Soleirolia</i>
Material alternativo	Humus (5%)	Cascarilla de arroz (5)	Aserrín (5%)	Arena (5%)

Por último, el agua de lluvia captada por el sustrato del techo verde pasa a través de un filtro de arena, compuesto en forma descendente por carbón activado (10 cm), arena lavada (10 cm), grava triturada (6 cm) y grava gruesa (5 cm). El propósito del filtro es disminuir la turbidez con la que el agua de lluvia se extrae del techo verde.

La Figura 7 presenta el prototipo de techo verde (a). Todos los sustratos están conformados por una mezcla de tierra de jardín y materiales alternativos al 10 y 5% del peso de la tierra, con el fin de obtener un sustrato de 10 cm de espesor. También se muestra el filtro de arena (b) implementado en el proceso de mejoramiento de la calidad del agua de lluvia. Los ensayos se realizaron entre el 30 de enero y el 24 de febrero de 2017.



Figura 7. Prototipo de techo verde (izquierda) y filtro de arena (derecha).

Los ensayos al prototipo incluyen la simulación de cinco precipitaciones características de Bogotá (30.6, 48, 64.56, 86.7, y 128.4 mm, respectivamente), las cuales están dentro del rango de valores de precipitaciones registradas en la capital colombiana sobre cada uno de los ocho compartimentos de techo verde que posee el prototipo. Se detiene el suministro de agua de lluvia a la media hora de iniciada la simulación y se mide el caudal de salida cada cinco minutos por una hora, registrando la cantidad de agua recolectada en dicho tiempo mediante un pluviómetro. También se miden las características de calidad de agua (conductividad, resistividad, sólidos en suspensión, salinidad, temperatura, pH, oxígeno y turbidez) antes y después de ser filtrada por el sustrato del techo verde.

Resultados

Se analizan tanto los resultados obtenidos en el programa *SWMM* como los resultados obtenidos de los ensayos con el prototipo de techo verde. Se presentan a continuación.

Modelación *SWMM* de la zona de afectación

Al comparar los lugares de inundación notificados por los residentes con los lugares inundados resultados en *SWMM*, se reconoce la carencia de algunas variables que no se tuvieron en cuenta, como la basura, conexiones erradas o fugas en el sistema. Se analiza el comportamiento de cada uno de los pozos inundados en el modelo mediante la comparación del nivel de inundación de dichos pozos con los resultados de los niveles de los mismos pozos con diferentes porcentajes de techos verdes implementados. Asimismo, se analiza la saturación de las tuberías actuales antes y después de la sustitución de los techos convencionales por techos verdes.

Los resultados arrojados por el programa *SWMM* indican en primera instancia los puntos de inundación para un periodo de retorno de tres años. La Figura 8 compara los puntos de inundación registrados por la comunidad (círculos pequeños), con las zonas inundadas resultado de la modelación (círculos grandes). Se presentan ocho áreas de inundación resultado del modelo. Según el mapa de la Figura 8, se presenta una mayor cantidad de inundaciones en la realidad. En la modelación realizada sólo se tuvieron en cuenta los parámetros descritos en la Tabla 1, pero la existencia de variables como fugas, conexiones erradas o

presencia de basura, que potencializan las inundaciones urbanas, repercuten en la proximidad del modelo y la realidad.

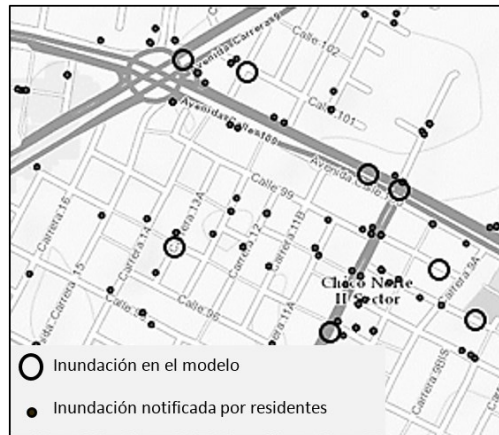


Figura 8. Comparación entre las zonas de inundación reales (puntos) y las zonas de inundación resultado del modelo (círculos).

Adicionalmente se hace el siguiente análisis: se tiene en cuenta dos pozos críticos, según los resultados de la anterior simulación (pozo 90 y pozo 146); un pozo de inspección tiene aportes de diferentes áreas de cubiertas; el análisis consiste en sustituir cierto porcentaje de techos convencionales a techos verdes, y observar el nivel de la inundación, después se incrementa el porcentaje de techos verdes hasta mitigar la inundación en los pozos.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la relación entre la cantidad de techos verdes implementados y el nivel de la inundación en el pozo. Se sustituyen las cubiertas que aportan directamente agua pluvial en los pozos. El pozo 90 tuvo una disminución de la inundación de 88.9%, al sustituir la totalidad de techos verdes que incidían directamente sobre el pozo, para una sustitución total de 4 732.21 m² de cubierta. Es considerable la disminución en la inundación de este pozo al sustituir las cubiertas que drenan agua pluvial directamente sobre los mismos. Sin embargo, el pozo 146 tuvo una reducción de 9.5%, conservando el problema de las inundaciones urbanas.

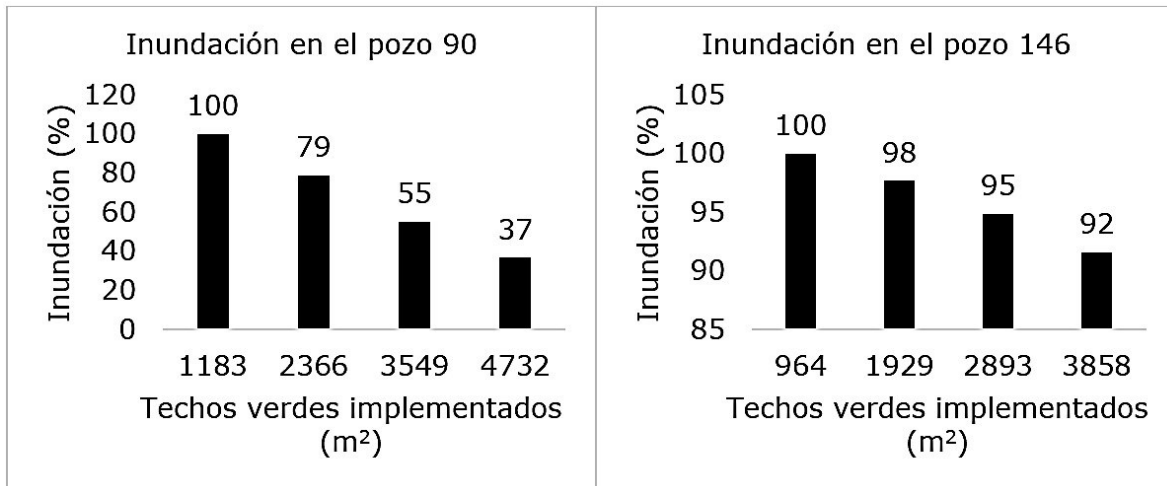


Figura 9. Comportamiento de fenómenos de inundación en función de la cantidad de techos verdes implementados.

En un sistema de alcantarillado pluvial que trabaja por gravedad, la acumulación del agua de lluvia tiende a aumentar en cotas inferiores, dado que los ductos deben tener la capacidad de manejar tanto los caudales que aportan las áreas impermeables de la zona circundante como los caudales de las áreas impermeables de cotas superiores. La probabilidad de inundación tiende a disminuir en función de la implementación de techos verdes no sólo en áreas circundantes a la zona de inundación sino también en zonas cuya cota sea superior a la del área que presenta la problemática.

Con el fin de contrarrestar las inundaciones urbanas, los techos verdes se consideran como una alternativa que debe involucrar a toda una comunidad. La colaboración y cooperación es el punto de partida en el cual se debe empezar a trabajar.

Para ilustrar el comportamiento de descarga de aguas lluvias en las tuberías con techos convencionales y con techos verdes en el modelo, se compara el sistema de alcantarillado pluvial de la zona de afectación en el instante en donde se presenta la máxima inundación. En la Figura 10, los ductos de tonalidad oscura indican una capacidad de drenaje normal, mientras que los ductos de tonalidad clara indican la saturación del tramo.

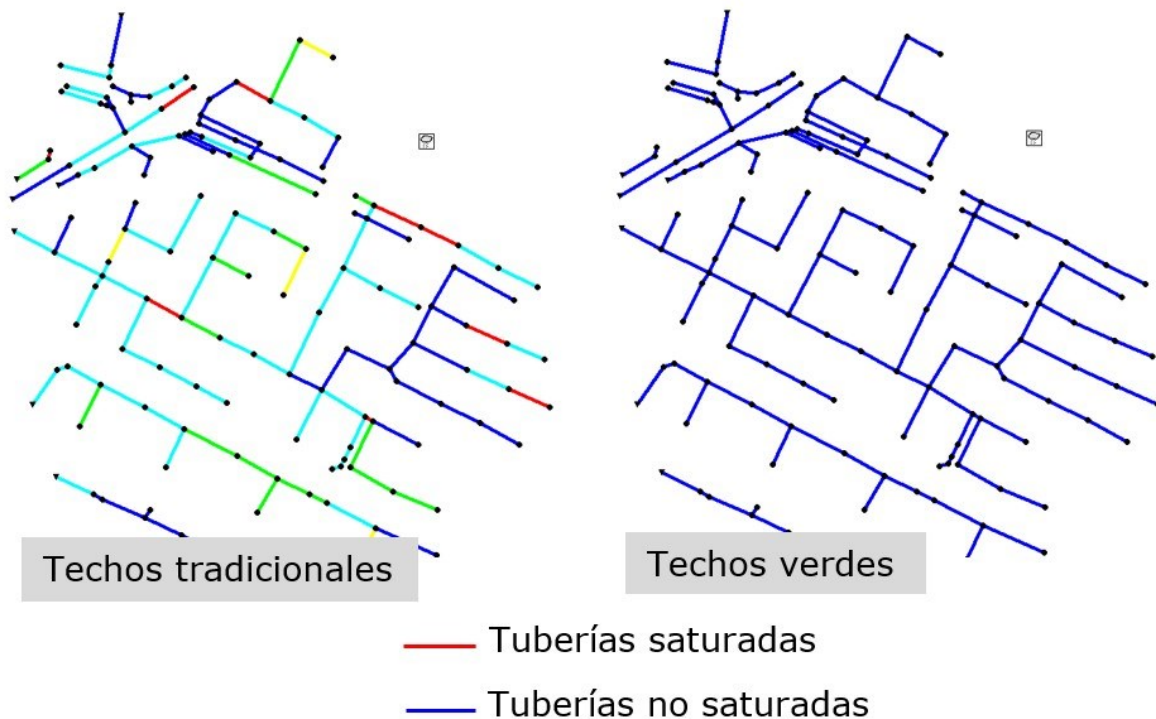


Figura 10. Comparación de tuberías en estado saturado (izquierda) con techos tradicionales y tuberías en estado normal (derecha) con techos verdes.

Prototipo de techo verde

En cuanto al prototipo de techo verde, se analiza la variación en la calidad del agua en función del tipo de planta sembrada, y los materiales alternativos mezclados junto con la tierra de jardín que conforma el sustrato de cada compartimento. También se analiza la capacidad de retención de agua pluvial de los sustratos del prototipo.

La función del techo verde radica en su capacidad de retención de agua pluvial como una alternativa para disminuir la probabilidad de inundaciones urbanas por empozamiento de agua pluvial. Esta

investigación propone como medida para gestión del recurso hídrico la reutilización del agua captada en actividades domésticas.

El agua pluvial, al filtrarse por el sustrato del techo verde modifica sus propiedades y se ven alteradas las condiciones de calidad del recurso. Los indicadores que poseen una evidente alteración son la conductividad, la resistividad, los sólidos en suspensión y el pH.

La Figura 11 y la **iError! No se encuentra el origen de la referencia.** presentan la variación de la conductividad y resistividad del agua filtrada, respectivamente. Se realizaron cinco simulaciones de lluvia, en las que se analizaron las propiedades del agua de lluvia antes de entrar al techo verde y una vez es filtrada por el mismo.

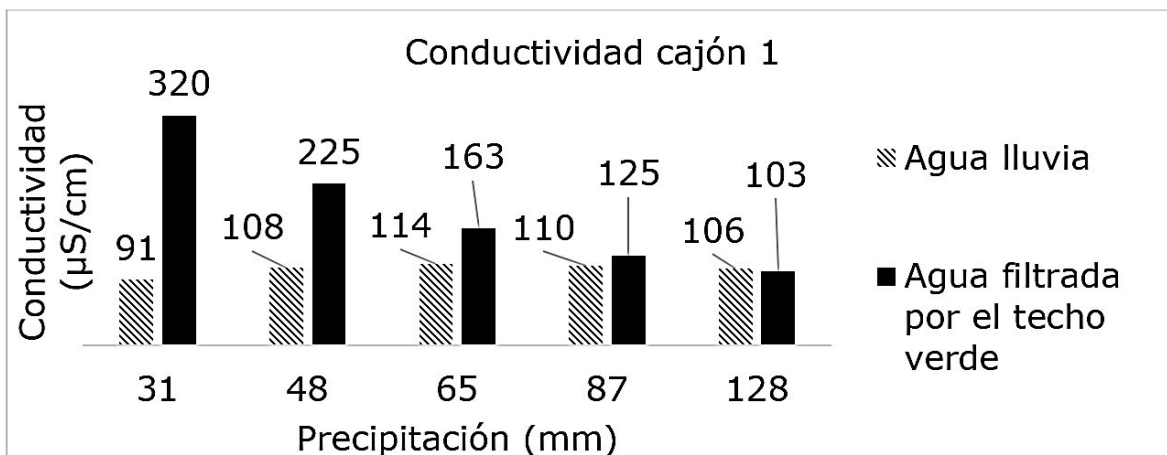


Figura 11. Cajón con comportamiento satisfactorio en cuanto a conductividad.

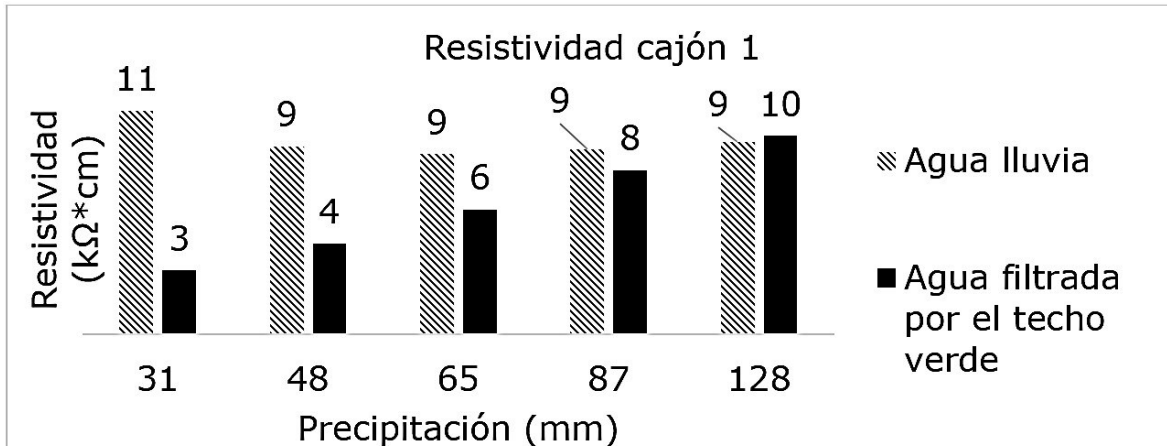


Figura 12. Cajón con comportamiento satisfactorio en cuanto a resistividad.

En el cajón 1, conformado por tierra de jardín y 10% de humus, se observa que el agua de lluvia una vez es filtrada a través del techo verde aumenta su conductividad y disminuye su resistividad. Después de realizar cinco simulaciones, los valores tanto de conductividad como de resistividad se estabilizan, alcanzando un valor similar al del agua de lluvia antes de filtrarse por el techo verde.

Cuando el agua de lluvia atraviesa el techo verde capta partículas de tierra de jardín y humus, por lo que incrementa la capacidad de conducir electricidad, razón por la cual su conductividad aumenta y por ende disminuye su resistividad. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el comportamiento de los sólidos en suspensión tanto del agua de lluvia como del agua filtrada por el techo verde; se evidencia que en las primeras simulaciones aumentan los sólidos suspendidos respecto al agua de lluvia, aunque al igual que en los dos primeros parámetros, después de cinco simulaciones de precipitación, los valores tienden a estabilizarse.

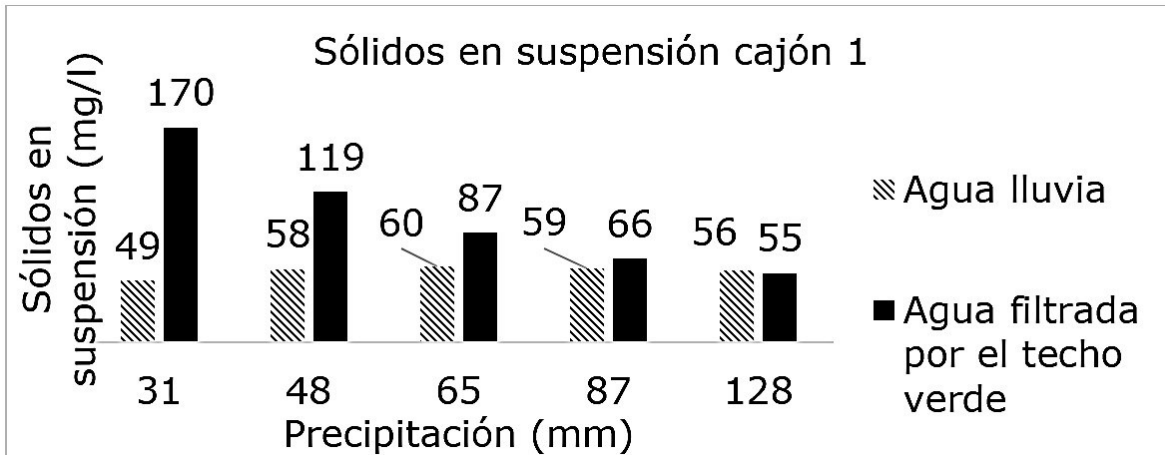


Figura 13. Cajón con comportamiento satisfactorio en cuanto a sólidos en suspensión.

El pH es una medida que indica el nivel de alcalinidad o acidez del agua, un parámetro importante a tener en cuenta en el consumo del agua potable, cuyo pH debe oscilar "entre 6 y 8.5" (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2000). Los resultados arrojados indican que el aserrín junto con la planta *Asparagus plumosus*, y la arena junto con la planta *Soleirolia* son eficientes en el control del pH del agua de lluvia, sin embargo estas plantas no poseen características de resistir ambientes extremos.

Para suministrar de agua de lluvia al prototipo se utiliza un tanque que almacena la precipitación; mediante una bomba se hace llegar el líquido a los compartimentos. Dado que durante la época de los ensayos no se presentaron eventos de precipitación, el agua empozada aumentó su acidez, por esta razón los valores de pH disminuyeron de modo paulatino.

Se evidencia la similitud entre el pH del agua filtrada y el pH del agua de lluvia, lo cual indica que el aserrín (ver **iError! No se encuentra el origen de la referencia.**) y la arena (ver Figura 15) en una mayor proporción podrían controlar de forma eficiente el pH y podría elevar este parámetro al ser filtrada por el techo; sin embargo, cabe la posibilidad de que al aumentar el porcentaje de arena en el sustrato del techo su capacidad de drenaje se vea afectada.

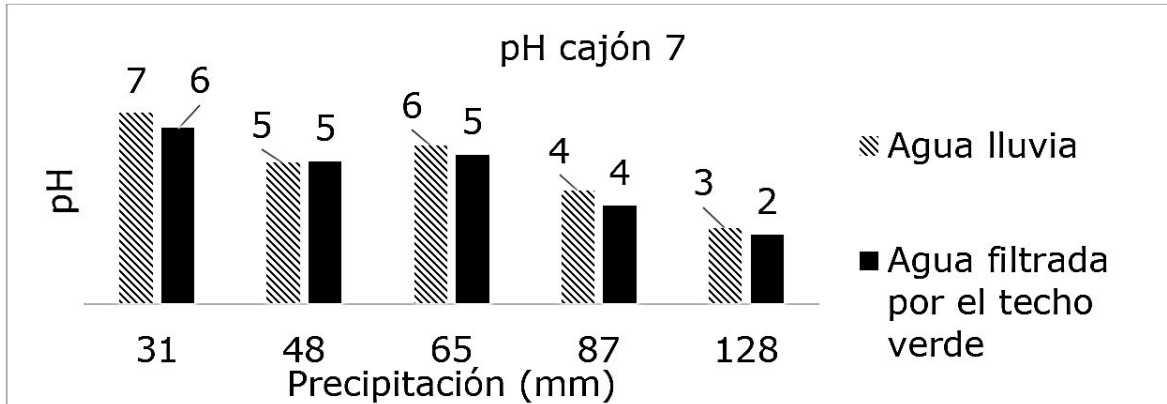


Figura 14. Cajón con comportamiento satisfactorio en cuanto a pH (aserrín).

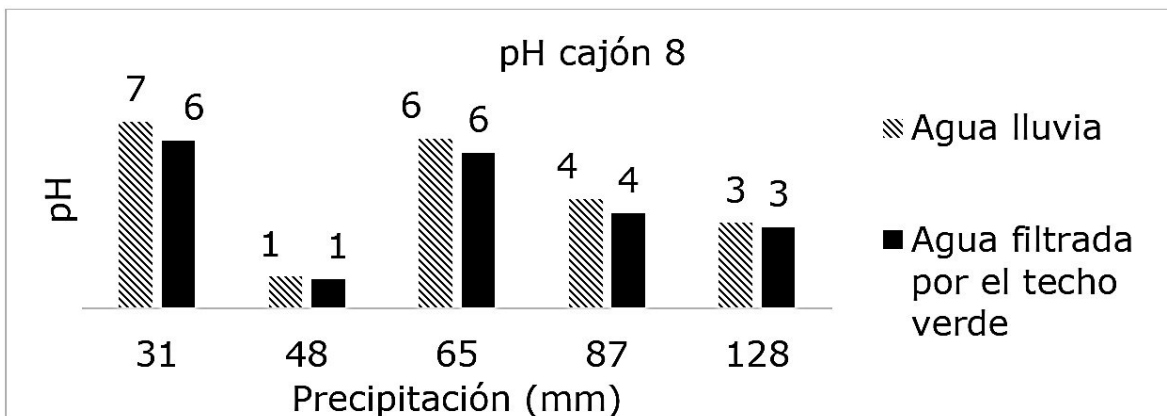


Figura 15. Cajón con comportamiento satisfactorio en cuanto a pH (arena).

El comportamiento de la turbidez del agua se debe al filtro de arena, el cual fue retro lavado para la segunda simulación de precipitación; a partir de este punto, la turbidez desciende, dado que se incluye un porcentaje mayor de carbón activado y no se vuelve a retro lavar en el resto de simulaciones.

Los techos verdes, aparte de controlar las condiciones del agua, como se analizó, también deben permitir el paso del agua de lluvia a una tasa que garantice la menor cantidad de escorrentía generada, puesto que la

principal razón de adoptar techos verdes es contrarrestar problemas de inundación urbana.

Los materiales alternativos con mayor índice de escorrentía son la arena y el humus. Por otro lado, la cascarilla de arroz y el aserrín obtuvieron altas tasas de infiltración respecto a los otros dos materiales estudiados. La **iError! No se encuentra el origen de la referencia.** compara el comportamiento característico de la cascarilla de arroz como material de infiltración, expuesta a una precipitación de 128.4 mm/min.

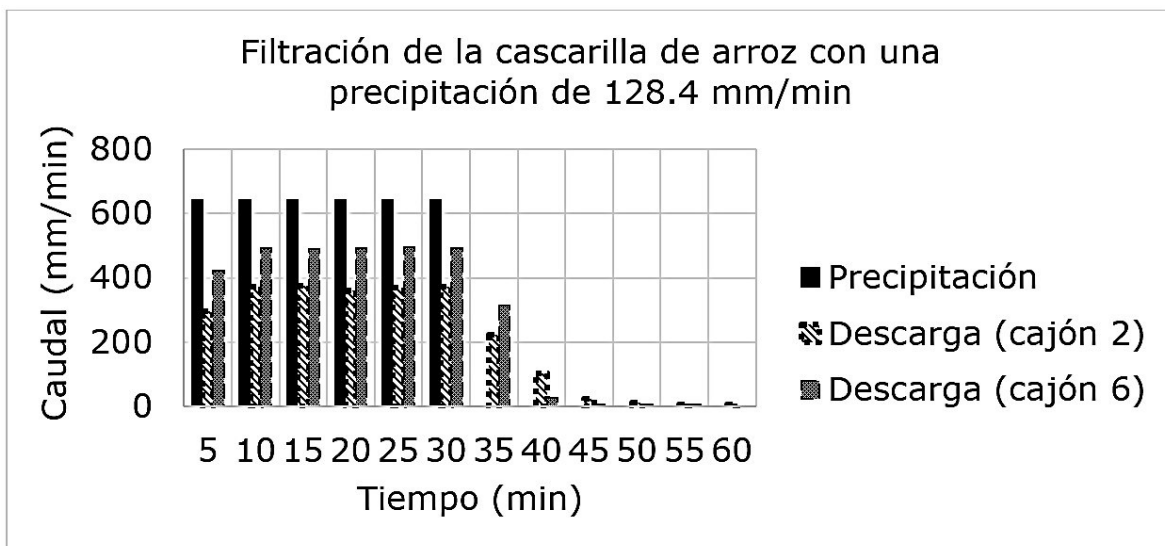


Figura 16. Comportamiento satisfactorio hidráulico del sustrato.

El cajón 2 (10% de cascarilla de arroz) presenta una captación mayor de agua de lluvia. Aunque se pueda pensar que una mayor capacidad de retención de agua es eficiente, el exceso en la captación del recurso puede generar inundaciones internas en el techo, lo que implica que se genere una escorrentía elevada. Por tal motivo se considera que el cajón 6 (5% de cascarilla de arroz) presenta condiciones satisfactorias de infiltración en el prototipo de techo verde.

Discusión y conclusiones

La modelación de la zona de afectación realizada en el *software SWMM* simula un proceso de inundación, el cual se atenúa con la implementación de techos verdes; sin embargo, en el área se presenta mayor cantidad de eventos de inundación registrados por los residentes que los eventos resultados de la modelación. La basura, conexiones erradas o fugas son parámetros que no son tenidos en cuenta para el modelo; estos elementos son potenciales generadores de inundaciones, dado que afectan el flujo del agua en los ductos o aportan caudal extra a las tuberías del alcantarillado.

Aunque los techos verdes pertenecen a los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), su función para contrarrestar las inundaciones se ve limitada por el caudal de entrada en el punto de inundación. Como se analizó en el caso de estudio de la localidad de Chapinero, las cubiertas sustituidas por techos verdes en el área circundante de la zona en donde se genera la inundación en ocasiones no son suficientes para mitigar este problema. Se debe reducir el caudal de entrada al ducto, con el fin de reducir la probabilidad de la saturación del mismo y, para ello, en la implementación de esta tecnología, las participaciones de estructuras situadas en cotas superiores contribuyen a contrarrestar dicha problemática.

Al ensayar diferentes sustratos de techos verdes ante distintas intensidades de precipitación, se obtuvieron datos de calidad de agua de lluvia antes y después del proceso de filtración a través del techo verde. Se encontró que después de cinco simulaciones de precipitación, el sustrato pasa a una condición en donde características como la conductividad, resistividad, salinidad, sólidos en suspensión y contenido de oxígeno permanecen constantes después del filtrado. Sin embargo, el pH tiende a disminuir. El aserrín y la arena como materiales alternativos fueron eficientes en el control del nivel de pH presente en el agua de lluvia.

Dentro de los factores que afectan la calidad del agua de escorrentía se incluye el sustrato, las plantas, las fuentes de contaminación local, la cantidad de lluvia, la fertilización y mantenimiento, la edad del techo verde, y las propiedades físicas y químicas de los contaminantes (Vijayaraghavan, Reddy, & Yun, 2019).

Los valores obtenidos de pH tienden a estar en el rango de 6.19 a 6.24 para los techos verdes que consideran las plantas *Asparagus plumosus* y *Soleirolia*, y los sustratos conformados por arena y aserrín, dado que son las alternativas que controlan de una manera más eficiente este indicador respecto a las demás propuestas. Otras investigaciones arrojan resultados promedio de pH para techos verdes con plantas *Sedum* de 6.64 (Todorov, Driscoll, Todorova, & Montesdeoca, 2018) en la ciudad de New York, EUA; 6.95 (Buffam, Mitchell, & Durtsche, 2016) en el estado de Ohio, EUA; 7.05 (Wang, Tian, & Zhao, 2017) en la ciudad de Tianjin, China, y 6.4 (Sultana, Akib, & Ashraf, 2017) en Malasia. Cabe agregar que los niveles de pH dependen asimismo del nivel de contaminación que presente la ciudad.

La turbidez del agua de lluvia después de ser filtrada por el sustrato tiende a aumentar, dada la presencia de material propio del medio de crecimiento. Una medida para controlar dicho parámetro es la implementación de un filtro de arena, el cual, después de uso frecuente, requiere de un proceso de retro lavado. Se recomienda utilizar un mecanismo eficiente para el retro lavado del filtro cada vez que ocurra un evento de precipitación, con el fin de garantizar la efectividad del filtro.

Por otro lado, se observó en la experimentación de esta investigación que el nivel de conductividad inicial considera valores de aproximadamente 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para un techo verde con humus y plantas *Sedum*, que después de cinco simulaciones de precipitación llega a estabilizarse en 106.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valor cercano al del agua de lluvia calculado en 103 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En otras investigaciones se resaltan valores cercanos de 100.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Sultana *et al.*, 2017), considerando una capa vegetal de especie *Plylathus* en Malasia; de 225 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Zhang *et al.*, 2014) en Chongqing, China, para un techo con plantas *Sedum*, y de 152 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Buffam *et al.*, 2016) en el estado de Ohio, EUA.

Los techos verdes poseen la capacidad de retener agua pluvial en su sustrato. Tanto el humus como la arena, al entrar al contacto con el agua, crean una especie de sello impermeable que impiden el flujo del agua, demorando su paso a través del techo; por el contrario, la cascarilla de arroz y el aserrín poseen tasas de infiltración altas con respecto al humus y la arena. La cascarilla de arroz genera un 33% menos de esorrentía que el aserrín en precipitaciones de 128.4 mm/min.

Las características de retención dependen ampliamente del espesor y materiales utilizados para el medio de crecimiento y del nivel de la precipitación del lugar. El sustrato que considera como material alternativo la cascarilla de arroz presenta variaciones en cuanto al porcentaje de retención, que oscila entre 23% (cajón 2) y 42% (cajón 6). Se han encontrado diferentes estudios que analizan la capacidad de retención de los techos verdes y se encuentra un rango de porcentajes amplio, que abarca porcentajes de 12 a 17% para un techo verde de 15 cm de espesor de sustrato, plantas *Sedum* y monitoreado en la ciudad de Portland, Oregon, EUA (Spolek, 2008); de 51% para un sustrato de 20 cm analizado en la ciudad de Génova, Italia (Palla, Gnecco, & Lanza, 2010); de 65.7% en un medio de crecimiento de 17 cm y plantas de biomasa analizado en la ciudad de Manchester, Reino Unido (Speak, Rothwell, Lindley, & Smith, 2013); y de 76.4 con un sustrato de 15 cm y plantas *Sedum* analizado en la ciudad de Beijín, China (Yang, Li, Sun, & Ni, 2015).

Agradecimientos

El autor agradece al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS), por la confianza y el apoyo brindado durante los seis meses en los que se desarrolló la investigación, en el marco de la convocatoria 743 "Jóvenes investigadores e innovadores 2016"; a los residentes de las localidades de Usaquén y Chapinero por su participación en las encuestas realizadas; a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), por proporcionar información vital en el desarrollo del modelo de la zona de afectada en *SWMM*; a los integrantes del semillero EcoCivil, por sus aportes para el desarrollo de la investigación.

Referencias

Speak, A. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J., & Smith, C. L. (2013). Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. *Science of the Total Environment*, 461-462, 28-38. Retrieved from <http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=reference&D=e med11&NEWS=N&AN=2013359896>

- Almanza, G. (2017). *Caracterización general del escenario de riesgo por inundación*. Bogotá, Colombia: Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático.
- Anderson, M., Lambrinos, J., & Schroll, E. (2010). The potential value of mosses for stormwater management in urban environments. *Urban Ecosystems*, 13(3), 319-332. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11252-010-0121-z>
- Banco Mundial. (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. En: *Sistema Nacional de Información Para La Gestión del Riesgo de Desastres*, 438. Retrieved from <https://doi.org/333.3109861/A56>
- Bernal-Pedraza, A. Y. (2010). Gestión del agua - una preocupación de las empresas ambientalmente responsables. *Universidad & Empresa*, (19), 87-106.
- Blackhurst, M., Hendrickson, C., Asce, D. M., Matthews, H. S., & Asce, A. M. (2010). Cost-effectiveness of green roofs. *Journal of Architectural Engineering*, 16(December), 136-143. Retrieved from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000589](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000589)
- Buffam, I., Mitchell, M. E., & Durtsche, R. D. (2016). Environmental drivers of seasonal variation in green roof runoff water quality. *Ecological Engineering*, 91, 506-514. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.02.044>
- Consejo de Bogotá. (2009). *Acuerdo 418 de 2009*. Bogotá, Colombia: Consejo de Bogotá.
- Conte, G., Bolognesi, A., Bragalli, C., Branchini, S., De Carli, A., Lenzi, C., Masi, F., Massarutto, A., Pollastri, M., & Principi, I. (2012). Innovative urban water management as a climate change adaptation strategy: Results from the implementation of the project "Water against climate change (wataclac)". *Water*, 4(4), 1025-1038. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/w4041025>
- DPAE, Departamento de Prevención y Atención de Emergencias. (2012). *Inundaciones Bogotá*. Bogotá, Colombia.
- El Espectador. (2016). *Inundaciones en Bogotá por fuertes lluvias*. Bogotá, Colombia: El Espectador.

- El Tiempo. (2015). *Barrios de seis localidades afectados tras fuerte granizada en Bogotá*. Bogotá, Colombia: El Tiempo.
- El Tiempo. (2016). *Fuertes inundaciones por lluvia en Bogotá*. Bogotá, Colombia: El Tiempo.
- Environmental Protection Agency, Water Supply and Water Resources Division, Efr, C. D. & M. Inc. (2004). *Manual del usuario-SWMM*. Washington, DCM, USA: Water Supply and Water Resources Division, Efr, C. D., & M. Inc.
- Fernández-Colón, G. (2009). La crisis del agua en América Latina. *Revista Estudios Culturales*, 2(4), 80-96.
- Universidad Militar Nueva Granada, & Secretaría Distrital de Ambiente. (2008). *Formulación del plan de ordenación y manejo de la cuenca del río salitre en el perímetro urbano del distrito capital*, (080), 438-757. Bogotá, Colombia: Universidad Militar, Secretaría de Medio Ambiente.
- Green Building Consul. (2017). *LEED*. Washington, DC, USA: Green Building Consul.
- Hashemi, S. S. G., Mahmud, H. B., & Ashraf, M. A. (2015). Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 669-679. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.163>
- Herrera, J. A. (2016, March 16). Construcción en Bogotá registró 8,2 millones de m² en proceso de construcción en 2015. *Observatorio de Desarrollo Económico*. Retrieved from <http://observatorio.desarrolloeconomico.gov.co/construccion-construccion-bogota/construccion-en-bogota-registro-82-millones-de-m2-en-proceso-de>
- Hoyos-Giraldo, R., Acevedo Correa, L.M., & Álvarez Cuadrado, A.D. (2014). Application of green roofs locally as a solution to the deficit of green areas in Medellín, 1-18. Medellín, Colombia: Universidad de Medellín.
- Johnston, J., & Newton, J. (2004). *Building green. A guide to using plants on roofs, walls and pavements, The Queen's Walk, London*. London, UK: Greater London Authority.

- Kamal, B. (2016). *Falta de agua preocupa a Medio Oriente y Magreb*. New York, USA: Inter Press Service.
- Kravits, R. (2007). Green begins from the roof down. *Campus Facility Maintenance*, 4(2), 34-36.
- Kroes, P. (2012). Technical artefacts: Creations of mind and matter. *A Philosophy of Engineering Design, Philosophy of Engineering and Technology*, 6, 127-161.
- López, G., García, M. M., Gameros, L. A., & De la Rocha, A. P. (2015). Uso de un sistema de ahorro de agua para conservar ecosistemas para el recurso hídrico. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(6), 125-135. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n6/2007-2422-tca-6-06-00125.pdf>
- López-Patiño, G., Martínez-Solano, J., Fuertes-Miquel, V., & López-Jiménez, A. (2011). Dimensionado de depósitos domésticos de aguas pluviales utilizando series temporales de datos. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(1), 51-64.
- Martínez-Austria, P. F., & Vargas-Hidalgo, A. (2016). Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(4), 139-154. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85030454836&partnerID=40&md5=23b782c675ac16be3d810bc077da05dc>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Minke, G. (2004). *Techos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Montevideo, Uruguay: Editorial Fin de Siglo.
- Nawaz, R., McDonald, A., & Postoyko, S. (2015). Hydrological performance of a full-scale extensive green roof located in a temperate climate. *Ecological Engineering*, 82, 66-80. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.061>
- Niño-Fierro, K. N. (2012). *Análisis para la gestión del riesgo de inundaciones en Bogotá: un enfoque desde la construcción social del riesgo*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.

- Observatorio Ambiental de Bogotá. (2016). *Precipitación Mensual - PMPLL*. Bogotá, Colombia: Observatorio Ambiental de Bogotá.
- ONU, Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. San Francisco, USA: Organización de las Naciones Unidas.
- Oviedo, N., & Torres, A. (2014). Atenuación hídrica y beneficios hidrológicos debido a la implementación de techos verdes ecoproductivos en zonas urbanas marginadas. *Ingeniería y Universidad*, 18(2), 291-308. Retrieved from <https://doi.org/10.11144/Javeriana.IYU18-2.hahb>
- Palla, A., Gnecco, I., & Lanza, L. G. (2010). Hydrologic restoration in the urban environment using green roofs. *Water*, 2(2), 140-154. <https://doi.org/10.3390/w2020140>
- Peña-Guzmán, C. A. (2016). El ciclo urbano del agua en Bogotá, Colombia: estado actual y desafíos para la sostenibilidad. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(6), 57-71.
- Psencik, C., & Heller, R. (2012). Is your building conducive to the installation of a green roof? *Operations Management*, 17(2), 30-31.
- RCN, Radio Cadena Nacional. (2017). *Fuertes lluvias en Bogotá dejaron deslizamientos, vehículos atrapados e inundaciones*. Bogotá, Colombia: Radio Cadena Nacional.
- Rivera, P., & Aguila, A. G. (2015). La gestión integral del agua en zonas urbanas: caso de estudio Zacatecas-Guadalupe, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(3), 125-142.
- Rosatto, H., Botta, G., Becerra, A., Tardito, H., & María, L. (2016). Problemáticas del cambio climático en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires - aportes de las cubiertas vegetadas en la regulación térmica/Climate change difficulties in the Buenos Aires city contribution of green roofs in regulating the thermal change. *Fca Uncuyo*, 48(1), 197-209.
- Saadatian, O., Sopian, K., Salleh, E., Lim, C. H., Riffat, S., Saadatian, E., Toudeshki, A., & Sulaiman, M. Y. (2013). A review of energy aspects of green roofs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 155-168.

- Secretaría de Hacienda. (2017). *Tendencia demográfica*. Retrieved from <http://www.institutodeestudiosurbanos.info/endatos/0100/0120/01211.htm>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2011). *Guía de techos verdes en Bogotá*. Bogotá, Colombia: Secretaría Distrital de Ambiente.
- Spolek, G. (2008). Performance monitoring of three ecoroofs in Portland, Oregon. *Urban Ecosystems*, 11(4), 349-359. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0061-z>
- Sultana, M. N., Akib, S., & Ashraf, M. A. (2017). Thermal comfort and runoff water quality performance on green roofs in tropical conditions. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1(1), 47-55. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/24749508.2017.1301058>
- Sun, C. Y., Lin, Y. J., Sung, W. P., Ou, W. S., & Lu, K. M. (2012). Green roof as a green material of building in mitigating heat island effect in Taipei City. *Applied Mechanics and Materials*, 193-194, 368-371. Retrieved from <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.193-194.368>
- Teemusk, A., & Mander, Ü. (2011). The Influence of green roofs on runoff water quality: A case study from Estonia. *Water Resources Management*, 25(14), 3699-3713. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9877-z>
- Todorov, D., Driscoll, C. T., Todorova, S., & Montesdeoca, M. (2018). Water quality function of an extensive vegetated roof. *Science of the Total Environment*, 625, 928-939. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.085>
- Vijayaraghavan, K., Reddy, D. H. K., & Yun, Y. S. (2019). Improving the quality of runoff from green roofs through synergistic biosorption and phytoremediation techniques: A review. *Sustainable Cities and Society*, 46(September 2018). Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.12.009>
- Wang, X., Tian, Y., & Zhao, X. (2017). The influence of dual-substrate-layer extensive green roofs on rainwater runoff quantity and quality. *Science of the Total Environment*, 592, 465-476. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.124>
- Wilkinson, S., Lamond, J., Proverbs, D. G., Sharman, L., Heller, A., & Manion, J. (2015). Technical considerations in green roof retrofit

- for stormwater attenuation in the Central Business District. *Structural Survey*, 33(1), 36-51. Retrieved from <https://doi.org/10.1108/SS-07-2014-0031>
- Yan, B. (2011). The research of ecological and economic benefits for green roof. *Applied Mechanics and Materials*, 71-78, 2763-2766. Retrieved from <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.71-78.2763>
- Yang, W. Y., Li, D., Sun, T., & Ni, G. H. (2015). Saturation-excess and infiltration-excess runoff on green roofs. *Ecological Engineering*, 74, 327-336. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.10.023>
- Zhang, Q., Wang, X., Hou, P., Wan, W., Li, R., Ren, Y., & Ouyang, Z. (2014). Quality and seasonal variation of rainwater harvested from concrete, asphalt, ceramic tile and green roofs in Chongqing, China. *Journal of Environmental Management*, 132, 178-187. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.009>
- Zielinski, S., Carlos, J., Paternina, V., & Marta, S. (2012). Green roofs: A feasible tool for environmental management in the hospitality sector of El Rodadero, Santa Marta? *Gestión y Ambiente*, (1), 91-104.