

**EVALUACIÓN DEL EFECTO TÉRMICO Y CAPTACIÓN DE  
ESCORRENTÍA PRODUCIDA POR UNA PLANTA PILOTO DE  
TECHO VERDE**



**Universidad de  
Cartagena**



**Facultad de  
Ingeniería**

**JESÚS JOSÉ DE POMBO ANGULO  
DANIEL JOSÉ GONZALEZ MARTINEZ**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

**2016**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO TÉRMICO Y CAPTACIÓN DE  
ESCORRENTÍA PRODUCIDA POR UNA PLANTA PILOTO DE  
TECHO VERDE**

**AUTORES:**

JESÚS JOSÉ DE POMBO ANGULO  
DANIEL GONZALEZ MARTINEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**DIRECTOR:**

JAVIER MOUTHON BELLO, PhD  
INGENIERO CIVIL

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: SANEAMIENTO AMBIENTAL  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MODELACIÓN AMBIENTAL (GIMA)

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

2016

## DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Como primer lugar este logro se lo debemos a Dios, el cual nos brindó la fortaleza para dar este importante paso en nuestras vidas. Como segundo lugar a nuestros padres, los cuales nos brindaron el apoyo incondicional y motivación para alcanzar cada una de las metas propuestas a lo largo de nuestras vidas.

Nuestro más sincero agradecimiento a nuestro director, el doctor Javier Mouthon Bello, que con gran dedicación nos guió y colaboró en el desarrollo de esta ardua investigación hasta el final. Así mismo, al grupo INASSA, por la donación de parte importante del equipo para la toma de datos experimentales, a la Ingeniera Dalia Moreno Egel, el Grupo de Investigación en Modelación Ambiental (GIMA) y el Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental (IHSA).

Por último, y no menos importante, agradecemos a nuestra Alma Máter por brindarnos una formación académica, personal y profesional que será esencial para toda la vida y a todos aquellos que de alguna manera han hecho parte de nuestro crecimiento personal e intelectual.

***“La ciencia no es sino una perversión de sí misma a menos que tenga como objetivo final el mejoramiento de la humanidad”***

*NIKOLA TESLA*

## RESUMEN

Los Techos Verdes son un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS) enfocado en el restablecimiento de las condiciones de drenaje y temperatura existentes previo a los procesos de urbanización. Con base en dicha premisa, este estudio fue desarrollado con el fin de evaluar el efecto térmico al interior de una edificación y de volúmenes de escorrentía en Cartagena de Indias por medio de estudios a escala piloto, a través de la identificación y selección de especies nativas aptas para ser integradas al sistema y el análisis de parámetros hidráulicos y térmicos de tres plantas piloto de 1 m<sup>2</sup> cada una, construidas siguiendo los manuales y guías para su diseño, y ubicadas en la azotea del edificio de laboratorios del Campus Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena, y correspondientes a dos de Techo Verde, conformadas por vegetación de Duranta (*Duranta Golden*) y Verdolaga (*Portulaca Oleracea*) y una cubierta de concreto convencional, operadas entre 21 de octubre y 20 de Noviembre de 2015 bajo la influencia de las condiciones ambientales de la zona. Con base en los análisis de cada uno de los parámetros a escala piloto se concluyó que la disminución de temperatura ambiente bajo los Techos Verdes conformados por Verdolaga fue 1.64°C menor a la del ambiente y 3.14°C a la cubierta de concreto y de Duranta 1.69°C y 3.20°C, sin embargo, no fue posible determinar la retención y disminución de escorrentía generados por el sistema debido a las condiciones de sequía influenciadas por el Fenómeno del Niño, aunque se obtuvieron datos parciales de su capacidad de retención, que permite determinar que puede ser superior a 20 mm de precipitación. De acuerdo con los datos obtenidos, bajo las condiciones climatológicas de Cartagena de Indias, los Techos Verdes son una opción viable para la disminución del consumo de energía eléctrica al interior de edificaciones y aunque no fue determinado completamente su efecto sobre los volúmenes de escorrentía, exhibieron mayor tasa de retención que las cubiertas de concreto.

## ABSTRACT

Green Roofs are Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) that try to reestablish the existing drainage and temperature conditions on a site prior to urbanization processes. Based on that statement, this research was developed in order to evaluate the indoor thermal effect and runoff on buildings located in Cartagena de Indias through pilot-scale studies by the identification and selection of different kind of suitable native species for being implemented in these systems and the analysis of hydraulic and thermal parameters from three pilot-scale Green Roofs, each one with an area of 1 m<sup>2</sup> constructed following guides and manuals and located on the rooftop of the laboratory building of the Piedra de Bolívar campus from the University of Cartagena; Two pilot-scale Green Roofs were composed of layers of Duranta (*Duranta Golden*) and Verdolaga (*Portulaca Oleracea*) and the other one of a concrete slab, and were operated between October 21<sup>st</sup> and November 20<sup>th</sup>, 2015 under the weather influence on the site. Based on the analysis of the mentioned pilot-scale green roof parameters it was concluded that the temperature under the assembly whose vegetation layer was composed of Verdolaga was 1.64 °C less than the air temperature outside and 3.14 °C less than the concrete slab, and the one composed by Duranta was 1.69°C and 3.20 °C less respectively. However, it wasn't possible to determine the runoff retention and attenuation of the peak flow produced by the pilot-scale Green Roofs due to the drought influenced by the “Fenomeno del Niño”, but it was obtained partial data related with its retention capacity, which allow to ascertain that it may be more than 20 mm rainfall. In accordance with the obtained data, it's concluded that Green Roof are suitable to be deployed under the influence of the climate in Cartagena de Indias in order to reduce the energy consumption due to air-conditioning. Also, although it was not assessed the runoff retention capacity, these systems shown higher retention rates than concrete slab.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1 OBJETIVOS .....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	16
1.3 ALCANCES.....	17
2 MARCO DE REFERENCIA .....	20
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	20
2.1.1 Techos Verdes en la disminución de la escorrentía .....	20
2.1.2 Techos Verdes en la disminución de la temperatura interna.....	24
2.2 MARCO TEÓRICO.....	31
2.2.1 Clasificación de los Techos Verdes .....	31
2.2.2 Diseño y Construcción de Techos Verdes .....	32
2.2.3 Gestión de Drenaje.....	35
2.2.4 Rendimiento en retención de aguas pluviales por los techos verdes. ....	36
2.2.5 Rendimiento de los techos verdes con descarga máxima de aguas pluviales. .	37
2.2.6 Rendimiento de los techos verdes en el tiempo de detención de aguas pluviales.	37
2.2.7 Efecto Térmico y Energético. ....	38
2.2.8 Rendimiento en la disminución de la temperatura debajo del sistema de techos verdes	38
2.3 ANTECEDENTES.....	39
3 METODOLOGÍA .....	44
3.1 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LA VEGETACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TECHO VERDE .....	44
3.1.1 Bio-ensayo para la selección del tipo de vegetación.....	45
3.2 CONSTRUCCIÓN DE TECHOS VERDES Y CUBIERTA DE CONCRETO CONVENCIONAL A ESCALA PILOTO. ....	45
3.3 OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TECHO VERDE Y LA CUBIERTA DE CONCRETO CONVENCIONAL. ....	49
3.3.1 Medición y recolección de parámetros de escorrentía. ....	49
3.3.2 Medición y recolección de datos de parámetros térmicos. ....	51
3.4 REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE DATOS. ....	52
3.4.1 Análisis de la información primaria.....	53
3.5 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN SECUNDARIA Y COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	54
3.5.1 Parámetros para la comparación y el análisis. ....	54
3.5.2 Evaluación de los resultados .....	55
4 RESULTADOS.....	56
4.1 SELECCIÓN DE LA VEGETACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TECHO VERDES .....	56
4.2 EFECTO TÉRMICO DE LOS SISTEMAS DE TECHO VERDE .....	58

4.3	EFECTO DE LOS TECHOS VERDES EN LA DISMINUCIÓN DE ESCORRENTÍA GENERADOS POR PRECIPITACIONES. ....	64
4.3.1	Rendimiento en retención de aguas pluviales. ....	66
4.3.2	Disminución de caudal pico de escorrentía.....	67
4.3.3	Aumento de tiempo de retención de aguas pluviales .....	68
5	CONCLUSIONES .....	69
6	LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sumario de investigaciones y sus resultados concernientes a la gestión de agua de los Techos Verdes .....	28
Tabla 2. Sumario de investigaciones y sus resultados concernientes a efecto Termico de los techos verdes .....	30
Tabla 3. Comparación de los distintos tipos de techo verde .....	31
Tabla 4. Especificaciones del suelo de sustrato para techos verdes extensivos.....	34
Tabla 5. Listado de plantas nativas aplicables a techos verde .....	45
Tabla 6. Esquema para la recolección de la información primaria de los parámetros de escorrentía. ....	53
Tabla 7. Esquema para la recolección de la información primaria de los parámetros térmicos .....	53
Tabla 8. Esquema para la información de los parámetros de escorrentía .....	54
Tabla 9. Esquema para la información de los parámetros térmicos.....	54
Tabla 10. Disminucion de temperatura de techos verdes con respecto a la temperatura ambiente y cubierta de concreto.....	62
Tabla 11. Inventario de precipitaciones analizadas para el estudio. ....	65
Tabla 12. Escorrentias generadas y indice %RPI para cada techo.....	67

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del distrito de Cartagena de Indias D. T. y C., departamento de Bolívar, Colombia. ....	17
Figura 2. Localización del campus Piedra de Bolívar, Universidad de Cartagena. ....	18
Figura 3. Representación gráfica de las plataformas de techo modelo de escala utilizada para evaluar la retención de aguas pluviales en el estudio de comparación superficie del techo. ....	21
Figura 4. Esquema experimental de techo verde. ....	22
Figura 5. Esquema experimental (a) Experimento A, (b) Experimento B, (c) Experimentos C y D y la sección transversal de los lotes de prueba. (d) Norton simulador de lluvia. ....	24
Figura 6. Esquema experimental del jardín en la azotea. ....	26
Figura 7. Esquema general de los componentes de un techo verde. ....	32
Figura 8. Elementos típicos usados como capa drenante. ....	33
Figura 9. Edificio de la Alcaldía de Chicago. ....	42
Figura 10. Vista en planta de los modelos de techo a escala piloto. ....	47
Figura 11. Componentes generales de cada uno de los sistemas de techo verde a escala piloto. ....	47
Figura 12. Vista frontal de uno de uno de los modelos de techo a escala piloto. ....	48
Figura 13. Vista frontal de los modelos de los modelos de techo a escala piloto. ....	49
Figura 14. Esquema general de equipos de los sistemas de techo verde y ambiente. ....	51
Figura 15. Esquema general de equipos modelo de cubierta convencional. ....	51
Figura 16. Esquema general de equipos del sistema de techo verde y cubierta convencional. ....	52
Figura 17. Condiciones iniciales ( DÍA 1) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera ....	57
Figura 18. Condiciones finales ( DÍA 15) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera ....	57
Figura 19. Temperatura ambiente y bajo cada uno de los sistemas de techo a lo largo del 27 de Octubre de 2015. ....	59
Figura 20. Temperatura en cada uno de los puntos de medición durante el horario diurno. ....	61
Figura 21. Temperatura en cada uno de los puntos de medición durante el horario nocturno. ....	62
Figura 22. Resultados de precipitación y escorrentia presentados el día 7 de Noviembre de 2015. ....	66

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Manuales de Diseño Utilizados para la Investigacion.....	76
Anexo 2. Información general de los artículos encontrados en las bses de datos de la Universidad de Cartagena con información relevante para esta investigacion .....	76
Anexo 3. Información general de los artículos encontrados en paginas web con estudios internacionales relevantes para esta investigacion .....	78
Anexo 4. Información general de los artículos encontrados en páginas web con estudios Nacionales relevantes para esta investigación .....	80
Anexo 5. Granulometría del sustrato que conforma los Techos Verdes.....	81
<b>Anexo 6.</b> Ficha Técnica del Humus Sólido que compone el sustrato de los Techos Verdes. ....	82
<b>Anexo 7.</b> Etapa constructiva de los sistemas de techo verde.....	83
<b>Anexo 8.</b> Condiciones ( DIA 2) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta,Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera .....	83
<b>Anexo 9.</b> Condiciones ( DIA 3) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta,Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera .....	84
<b>Anexo 10.</b> Condiciones ( DIA 4) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta,Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera .....	84
<b>Anexo 11.</b> Condiciones ( DIA 5) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta,Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera .....	85
<b>Anexo 12.</b> Condiciones ( DIA 6) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta,Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera .....	85
<b>Anexo 13.</b> Condiciones ( DIA 7) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta,Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera .....	86
<b>Anexo 14.</b> Condiciones ( DIA 8) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta,Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera .....	86
<b>Anexo 15.</b> Condiciones ( DIA 9) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta,Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera .....	87
<b>Anexo 16.</b> Condiciones ( DIA 10) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera .....	87
<b>Anexo 17.</b> Condiciones (DIA 11) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera .....	88

<b>Anexo 18.</b> Condiciones (DIA 12) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera .....	88
<b>Anexo 19.</b> Condiciones (DIA 13) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera .....	89
<b>Anexo 20.</b> Condiciones (DIA 14) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera .....	89
<b>Anexo 21.</b> Resultados de precipitación y escorrentia presentados el día 30 de Octubre de 2015.....	90
<b>Anexo 22.</b> Resultados de precipitación y escorrentia presentados el día 3 de Noviembre de 2015.....	90
<b>Anexo 23.</b> Resultados de precipitación y escorrentia presentados el día 12 de Noviembre de 2015.....	91
<b>Anexo 24.</b> Resultados de precipitación y escorrentia presentados el día 16 de Noviembre de 2015.....	91

## INTRODUCCIÓN

Mientras las ciudades crecen con el fin de albergar más personas, la naturaleza empieza a ocultarse debajo y en medio de las grandes edificaciones. Este fenómeno ha venido alterando las condiciones naturales, previamente existentes en un sitio, produciendo aumento de la temperatura, fenómeno denominado isla de calor por ser la zona urbana una zona de elevada temperatura en medio de un océano frío, que es la zona rural, y la disminución de zonas permeables, las cuales contribuyen al aumento de la escorrentía superficial en dichos centros.

Usualmente el aumento de escorrentía superficial al interior de las ciudades ha sido controlado mediante la construcción de sistemas de drenaje pluvial convencionales, basados en colectores cuyo objetivo primordial es evacuar lo antes posible dichas escorrentías, lo cual, sin embargo, por el desarrollo urbano no planificado y los elevados índices de urbanización la gran mayoría de los instalados en los centros urbanos han colapsado, dando lugar a inundaciones (MOMPARLER, 2007) a causa de los elevados flujos usualmente que tienen lugar en este tipo de sistemas (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014).

Los problemas anteriormente mencionados se han acrecentado por la creciente utilización de materiales con bajo albedo e impermeables como el concreto, dejando a un lado materiales con gran capacidad de aislamiento térmico y drenaje, que se asemejan en comportamiento al suelo natural y vegetación, los cuales absorben poco calor e infiltran gran cantidad de escorrentía superficial, ayudando a disminuir la temperatura y los caudales de escorrentía superficial tan altos en las ciudades que conllevan a la construcción de gigantescas estructuras de drenaje.

En los centros urbanos de Colombia existen muchos problemas concernientes a las inundaciones, ya que los sistemas de drenaje urbano no son lo suficientemente grandes y no satisfacen los requerimientos de evacuación de aguas lluvias cuando se presentan caudales pico, además, como es el caso de Cartagena de Indias, ciudad costera del Caribe Colombiano que sufre estos problemas de inundaciones en la mayoría de las épocas de lluvias y que por

su localización se le añade que su temperatura ambiente es relativamente alta en comparación con la temperatura de confort, por ello se plantea como una alternativa la implementación de sistemas de techos verdes para mejorar las problemáticas con una visión sostenible.

El efecto de la isla de calor en las zonas urbanas de clima cálido conduce de manera indirecta al incremento en el consumo de energía al interior de las edificaciones, principalmente debido al aumento en la demanda de equipos de ventilación, e incluso la pérdida de vidas (Alexandri, 2001), además de reducir de confort humana y sumarse al efecto del calentamiento global.

A pesar de que se han planteado diversas soluciones para mitigar este efecto, las cuales involucran la selección de materiales y orientación de las edificaciones, la más efectiva es el aumento de los espacios verdes (Tumini, 2010), gracias al calor latente, la evapotranspiración y la sombra que proporcionan las plantas; Se ha reportado que un árbol promedio durante un día soleado de verano evapora 1460 kg de agua, consumiendo cerca de 860MJ de energía, lo cual es un efecto equivalente a cinco aires acondicionados promedio (Alexandri, 2001).

Existen sistemas que permiten mitigar dicha problemática en los centros urbanos, como son los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), cuya finalidad es el manejo de agua de forma que simule condiciones naturales, similares a las existentes antes de los procesos de urbanización. Entre los SUDS se encuentran los Techos Verdes, que integran la naturaleza en su sistema, aportan un valor estético, y ayuda a mitigar los efectos de isla de calor urbana, la temperatura bajo el techo y reducir los caudales de escorrentía. Estos sistemas han sido implementados en muchos países como Alemania, Estados Unidos, España, Holanda, Singapur y otros.

En Colombia la ciudad que más avanza en la implementación del sistema de techos verdes es Bogotá D.C., que cuenta con aproximadamente 32 000 m<sup>2</sup> de techos verdes, ubicados en edificios privados como hoteles, restaurantes y centros comerciales, entre los cuales se destaca la labor de la Secretaría Distrital de Ambiente, que en el año 2010 construyó 1400

m<sup>2</sup> en terrazas de edificaciones en cumplimiento de las disposiciones del Acuerdo Distrital 418 de 2009.

La Subdirección de Eco-urbanismo y Gestión Ambiental Empresarial desarrolló durante el año 2013 la campaña “Una piel natural para Bogotá”, así mismo, se han estipulado los Decretos 959 de 2000, 506 de 2003 y demás norma reglamentarias en manera de publicidad exterior visual en las que se contempla el uso de estos como elementos de Publicidad Exterior Visual, y en el proyecto de acuerdo No. 386 de 2009 (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014). De igual manera, en 2011 fue publicada la “Guía Técnica de Techos Verdes”, donde se establecen los requisitos y recomendaciones técnicas para garantizar la calidad y el buen funcionamiento de este tipo de techos en el Distrito Capital (Secretaria Distrital de Ambiente, 2011) y como complemento a esta en Mayo de 2014 fue publicada la “Guía de Techos Verdes y Jardines Verticales”. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014)

El desarrollo de este sistema en Cartagena de Indias es incipiente, a pesar de ser una zona afectada constantemente por lluvias durante la época húmeda y altas temperaturas, con una precipitación media total de 1 021mm/año y 95 días de lluvias en promedio, junto con una temperatura promedio de 27.7 °C y brillo solar promedio de 215 horas/año (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. CIOH, 2010). Se proyecta que para 2040 la población afectada por inundaciones derivadas de precipitación será de 201.108 habitantes y la temperatura aumente en promedio 3°C para el año 2100, lo cual conllevará a la posible alteración de los servicios ambientales, el aumento de la proliferación de vectores de enfermedades como dengue y malaria, y el incremento de uso de refrigerantes, lo que se traduce en mayor consumo de energía (INVEMAR-Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias-CDKN, 2012) .

Esta situación da lugar al desarrollo de investigaciones de este sistema de SUDS en la ciudad de Cartagena de Indias, principalmente con experimentación a nivel piloto usando vegetación nativa, por ser dicha investigación pionera en la ciudad, con el fin de contribuir a la

consecución de respuestas a interrogantes como: ¿Existe en la ciudad vegetación nativa apta para este sistema? y ¿Qué tanta eficiencia en la disminución de escorrentía superficial y de temperatura al interior de edificaciones presenta este sistema con respecto a las cubiertas de concreto para las condiciones ambientales de la ciudad?

El análisis de los resultados condujo a afirmar que si existe vegetación nativa apta para la implementación de los sistemas de Techo Verde en Cartagena, teniendo en cuenta que al inventario de plantas a las cuales se les hizo un análisis de su resistencia a largos periodos de sequía, arrojando una resistencia considerable de dichas plantas (hasta de 15 días) sin tener que ser regadas con agua, sin embargo no mantienen sus condiciones físicas de color, forma y textura de las hojas; esto hace recomendable su riego para garantizar sus condiciones físicas normales.

El estudio además comprendió la determinación de la eficiencia en la disminución de la temperatura y de volumen y caudal de escorrentía y tiempo de retención producido por un Techo Verde en comparación con una cubierta de concreto convencional mediante un estudio a escala de laboratorio, para lo cual se construyeron tres plantas piloto, dos de Techo Verde, una compuesta por Verdolaga (*Portulaca Oleracea*) y otra por Duranta (*Duranta Golden*), y una de referencia, conformada por una plantilla de concreto, que representa una cubierta de concreto convencional.

Las plantas piloto fueron construidas y ubicadas en la azotea del edificio de laboratorios del Campus Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena, y operadas bajo la influencia de la temperatura, precipitación y demás condiciones climatológicas existentes en el sitio durante el periodo de operación, comprendido entre el 21 de Octubre y 15 de Noviembre de 2015.

De los análisis de los datos obtenidos, se determinó que los Techos Verdes a escala piloto garantizaron una disminución de temperatura promedio durante un día completo (24 h) al emplear Verdolaga y Duranta como vegetación. Además, el análisis de los resultados

referente a la disminución de volumen, caudal de escorrentía y tiempo de retención se determinó que para las condiciones ambientales, principalmente los eventos de lluvia y sequía presentes durante el periodo de operación no se pueden hacer afirmaciones ya que debido fenómeno del niño que se presentó, no se dieron las precipitaciones necesarias para hacer un análisis comparativo completo con otros estudios. Teniendo como referente dichos resultados es posible tener un mayor referente acerca del efecto térmico que puede producir este tipo de sistemas, principalmente en Cartagena de Indias.

El presente proyecto se constituye como uno de los pocos que contribuyen a determinar el efecto térmico y captación de escorrentía de los techos verdes en regiones con climas tropicales semiáridos, así mismo, es el primero en ser aplicado a Cartagena de Indias. No menos importante, se ha soportado a través de la experimentación la implementación de Verdolaga y Duranta como especies aptas para ser integradas a techos verdes.

Los hallazgos productos de la investigación por su carácter pionero permiten sentar las bases para la aplicación de sistemas de techos verdes considerando aspectos de diseño, construcción y operación, con el fin de evaluar las ventajas que pueden suministrar en disminución de escorrentía superficial y beneficio térmico, generando un estudio investigativo impulsado por el grupo de investigación de Modelación Ambiental (GIMA) del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Cartagena, apoyando la planeación e implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible en la ciudad y permitiendo las bases para el diseño y operación de techos verdes en la ciudad de Cartagena por parte de la Universidad de Cartagena, en su labor de innovación liderando procesos de implementación de construcción sostenible y amigable con el ambiente.

# 1 OBJETIVOS

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto térmico y de volúmenes de esorrentía generados por la implementación de techos verdes en la ciudad de Cartagena mediante ensayos a escala piloto utilizando vegetación nativa que permita el análisis de parámetros hidráulicos y térmicos.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Identificar las especies nativas de la ciudad de Cartagena, con el fin de escoger dos de ellas que cumplan con las condiciones de funcionalidad y estética requeridas para integrar un sistema de techo verde.
2. Determinar la temperatura al interior y al exterior de cada planta piloto, integrado con los sistemas de techo verde y techo convencional de concreto, para así determinar el efecto térmico interno proporcionado por el sistema de techo verde y además compararlo con un techo convencional de concreto.
3. Determinar los parámetros hidráulicos de caudal de entrada, caudal de salida, tiempo y volumen de retención con el fin de analizar la eficiencia del sistema de techo verde en la disminución de volúmenes de esorrentía generados por lluvia y compararlos con los obtenidos en el techo convencional de concreto.

### 1.3 ALCANCES

El desarrollo de la investigación referente a la evaluación del efecto térmico y balance hidráulico se llevó a cabo al interior de las instalaciones de la Universidad de Cartagena, campus Piedra de Bolívar, localizado en el distrito de Cartagena de Indias D. T. Y C., departamento de Bolívar, Colombia, en las coordenadas geográficas: 10° 24' 9.33" N, 75° 30' 18.51" O.

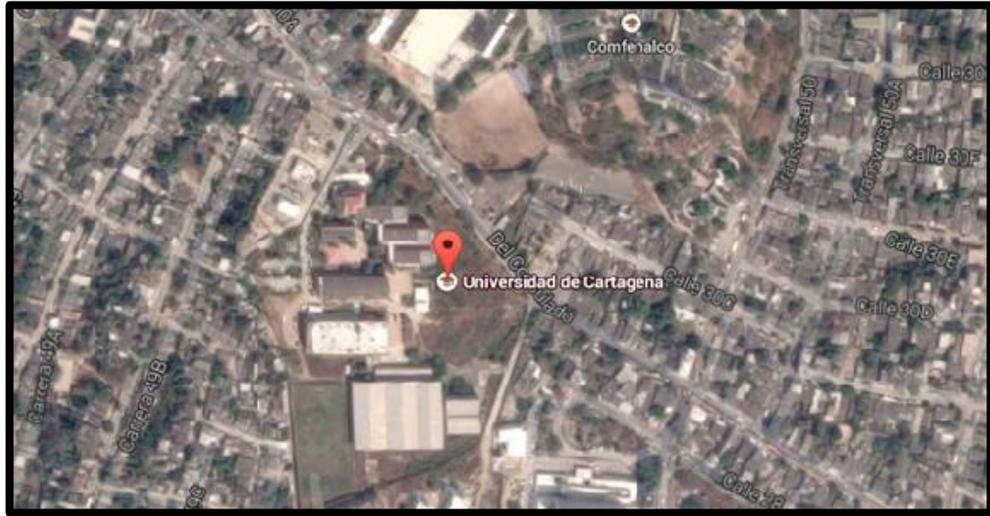
*Figura 1. Localización del distrito de Cartagena de Indias D. T. y C., departamento de Bolívar, Colombia.*



*Fuente: Google Maps.*

El proyecto de investigación se desarrolló durante el segundo semestre de 2015, iniciando en el mes de Agosto y finalizando a principios del mes de Noviembre. La investigación se fundamenta en las condiciones hidrológicas, vegetativas y térmicas presentes en la ciudad de Cartagena de Indias.

*Figura 2. Localización del campus Piedra de Bolívar, Universidad de Cartagena.*



*Fuente: Google Maps.*

El proyecto de investigación se limitó a la evaluación del efecto térmico al interior de tres plantas piloto a escala laboratorio de iguales dimensiones, dos que cuentan con un sistema de techo verde y con una cubierta de concreto convencional, y comprende la comparación de la temperatura medida al interior y exterior de cada una, además se evaluó y comparó el balance hídrico producido en el interior de cada sistema de techo verde a escala piloto y concreto convencional de la escorrentía generada por lluvias naturales, por medio de la medición de parámetros como: caudal de entrada, caudal de salida, tiempo y volumen de retención;

Se espera que esta investigación sirva como inicio a la construcción y aplicación de los techos verdes en la ciudad de Cartagena de Indias, como solución de impacto ambiental en disminuir el caudal de escorrentía generado por lluvias, de tal forma que aumenten los tiempos de retención y caudal pico y que contribuya a la disminución de la temperatura al interior del techo con respecto a aquellos compuesto de concreto.

Como producto final se entregaron dos plantas piloto de techo verde y una cubierta de concreto a escala piloto que contribuyen a complementar el inventario de sistemas urbanos de drenaje sostenible a escala de laboratorio presente en la facultad de Ingeniería de la Universidad de Cartagena. Además, se busca que esta planta piloto genere la capacidad y el interés necesario para desarrollar futuros estudios relacionados con el tema que contribuyan a su mayor conocimiento e implementación en la ciudad de Cartagena.

## 2 MARCO DE REFERENCIA

En este numeral se recopila y analiza la información secundaria seleccionada referente a los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), basada específicamente en sistemas de Techo Verde, con la finalidad de analizar, comparar y aprender de los resultados de las investigaciones, que se han hecho referente a los techos verdes, enfatizando en la aplicación de estos en la disminución de escorrentía superficial y reducción de temperatura al interior de una edificación.

### 2.1 ESTADO DEL ARTE

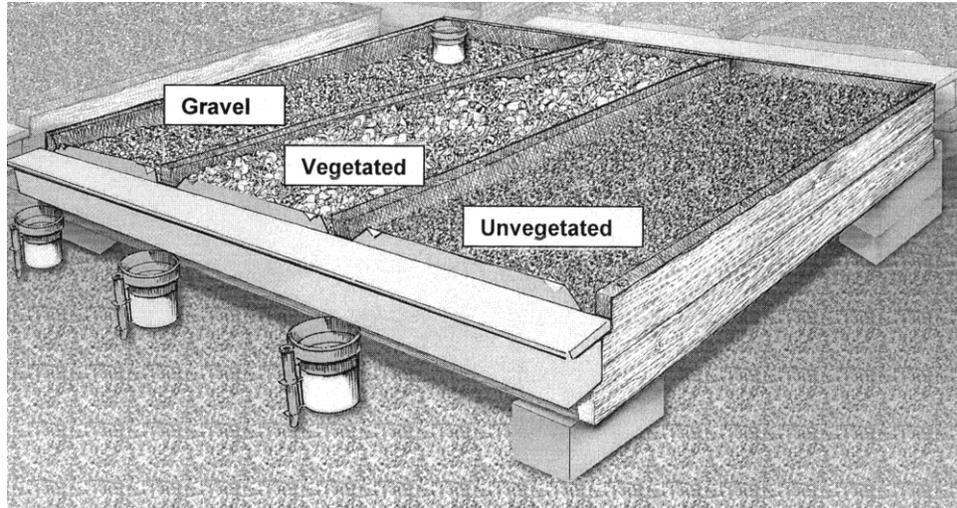
La evaluación del efecto térmico y captación de escorrentía producida por una planta de techo verde a escala piloto usando vegetación nativa es la primera investigación en la aplicación de techos verdes en la ciudad de Cartagena. Cabe resaltar que en la Universidad de Cartagena se viene adelantando un proceso de investigación acerca de los sistemas urbanos de drenaje sostenible, con el fin de lograr un desarrollo en la ciudad con respecto a la implementación de los mismos.

#### *2.1.1 Techos Verdes en la disminución de la escorrentía*

En el año 2005 se realizó un proyecto de investigación en Estados Unidos auspiciado por la Sociedad Americana de Agronomía (ASA), Sociedad Americana de Ciencia de los Cultivos (CSSA) y la Sociedad de Ciencias del Suelo (SSSA). Esta investigación se sustentó en el establecimiento de vegetación en los techos, conocido como techos verdes, como un método de recuperar el espacio verde perdido, que puede ayudar en la mitigación de la escorrentía de aguas pluviales. Uno de los estudios realizados en esta investigación se basó en cuantificación de los efectos de retención de aguas pluviales mediante varias plataformas de techo verde. Este estudio utilizó tres superficies de techo diferentes para cuantificar las diferencias en su retención de aguas pluviales con respecto a un techo convencional estándar, utilizando como superficies grava, un sistema de techo verde sin vegetación y una amplia

azotea verde con vegetación, estos esquemas son mostrados en la Figura 3. Cada plataforma de simulación de techo incluía capas de aislamiento, capas protectoras y una membrana de impermeabilización.

*Figura 3. Representación gráfica de las plataformas de techo modelo de escala utilizada para evaluar la retención de aguas pluviales en el estudio de comparación superficie del techo.*



Fuente: (VanWoert ND, 2005)

Este estudio fue calibrado para la medición de precipitaciones mediante pluviómetros que fueron instalados para cada plataforma de techo verde, el sistema fue monitoreado durante dos meses, tomando mediciones cada cinco minutos, las 24 horas del día, usando un Datalogger Campbell Scientific CR10X. Los resultados mostraron una retención significativamente alta con respecto a los techos convencionales estándar, la retención general de precipitaciones oscilaron entre el 48,7% (grava) a 82,8% (vegetación). (VanWoert ND, 2005)

En 2010, la Universidad Tecnológica de Delft en los países bajos, con ayuda de la Alianza del Agua de Singapur-Delft elaboró un informe de estudio de caso en Singapur, basada en la investigación acerca de los efectos de techos verdes en el ciclo hidrológico. Los principales objetivos de la investigación fueron: analizar los efectos de los techos verdes en la precipitación-escorrentía en Singapur y determinar la contribución hidrológica cuantitativa

de techos verdes a gran escala en los sistemas de drenaje sostenible de aguas pluviales en Singapur. En el estudio se utilizó para medir y simular los procesos de precipitación-escorrentía la construcción de plataformas de techo verde a escala experimental con área de  $1 \text{ m}^2$ , estos esquema experimentales de techos están representado en la Figura 4; se analizaron los datos de escorrentía empleando una profundidad de suelo de 12 cm y un techo de referencia, compuesto de concreto, para 66 eventos de lluvia en cuatro períodos de un mes, midiendo en cada uno su retención, reducción de caudal pico, las variables de retención y de flujo de base e indicadores de desempeño que se utilizan para cuantificar los efectos hidrológicos de los techos verdes. (Spengen, 2010)

*Figura 4. Esquema experimental de techo verde.*



Fuente: (Spengen, 2010)

El análisis de las mediciones experimentales muestra que la plataforma de techo verde retuvo 39% (234 mm) más precipitación que el techo de referencia y redujo el caudal máximo 64% en comparación con el techo de referencia. El instante de tiempo del caudal pico promedio del hidrograma de techo verde apareció 34 minutos después que el máximo del techo de referencia, y la plataforma de techo verde presentó una escorrentía media de 0,41 litros/m<sup>2</sup>. Sin embargo, los valores de rendimiento promedio del experimento no dan implicaciones

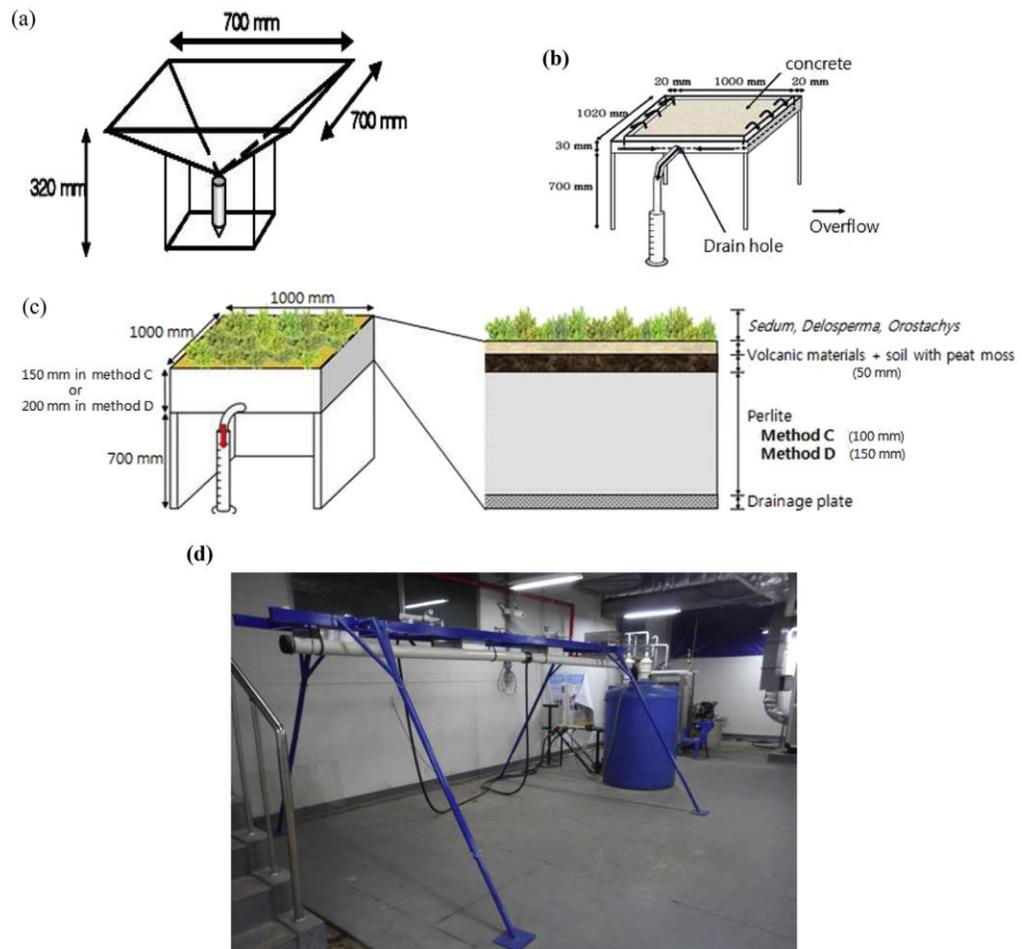
prácticas si los techos verdes son una solución eficaz en la gestión de las aguas pluviales. En cambio, la retención es la principal función de los techos verdes ya que pueden almacenar gran volumen de lluvias. (Spengen, 2010)

Recientemente en el año 2011, en Corea del sur, se elaboró una investigación para evaluar la reducción de la escorrentía a través de una extensa azotea verde, basándose en cuatro tipos de eventos de lluvia simulados. La cantidad y calidad de la escorrentía retenida se evaluó para cuatro tipos de instalaciones de techo a escala piloto con diferentes superficies: acrílica, hormigón y dos diferentes modelos de techo verde, estos se establecieron en la azotea de la Universidad Nacional de Seúl. El esquema experimental se ilustra en la Figura 5. Los datos para la simulación de las lluvias fueron suministradas por la oficina meteorológica de Seúl.

Para la simulación de los eventos fue utilizado un Norton Simulador de precipitaciones con dos cabezas, modelo (DIK-600), que fue desarrollado por el laboratorio de investigación de erosión del suelo nacional (NSERL), del Servicio de Investigación agrícola (ARS) perteneciente al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en la Universidad de Purdue, West Lafayette, Indiana.

Esta investigación arrojó que los techos verdes de 200 mm de profundidad de suelo tienen una eficiencia de 42.8% a 60.8% en la reducción de la escorrentía y los techos verdes con 150 mm de profundidad del suelo una efectividad de 13,8% a 34.4% en la reducción de la escorrentía. Mediante el uso de análisis de correlación de Spearman, ha demostrado que la alta intensidad de las precipitaciones tiene una relación negativa con el tiempo de retención, lo que demuestra que los medios del suelo en los techos verdes no retienen el agua de lluvia de manera eficiente. Además los investigadores afirman que el aumento del número de días secos puede ayudar a mejorar la capacidad de retención de agua y tiempo de retención. (Ju Young Lee, 2015)

Figura 5 .Esquema experimental (a) Experimento A, (b) Experimento B, (c) Experimentos C y D y la sección transversal de los lotes de prueba. (d) Norton simulador de lluvia.



Fuente : (Ju Young Lee, 2015)

### 2.1.2 Techos Verdes en la disminución de la temperatura interna.

En 2000, se elaboró una investigación en la Universidad Nacional Kapodistrian de Atenas, enfocada al análisis de las propiedades térmicas de los techos verdes y su rendimiento energético; Los objetivos principales del estudio fueron la presentación de la situación existente y la inferencia de los resultados relativos al microclima del ambiente interior y exterior de los edificios donde el techo verde ha sido localizado, la evaluación de las propiedades térmicas del techo verde a través del enfoque experimental y matemático y la estimación del impacto del sistema sobre el ahorro de consumo de energía de los edificios.

El análisis se realizó en dos fases, inicialmente la medición experimental llevada a cabo en el verano de 2000 ( 30 de junio – 17 de agosto) en un hotel situado en la región de Loutraki, cerca de la extendida cuenca de Atenas; las mediciones experimentales fueron recolectadas en los espacios interiores y exteriores donde el techo verde fue colocado, además se midió la temperatura interior y exterior de los edificios adyacentes, después de esto se realizó un estudio de las propiedades térmicas de la cubierta verde y su rendimiento térmico utilizando un programa matemático. (A.Niachou, 2001)

En el estudio, se utilizaron para las mediciones de temperatura una cámara de termografía infrarroja para la temperatura de la superficie, un termómetro de infrarrojos para la medición interior y temperaturas de la superficie exterior, Un termómetro  $\pm$  psicrómetro para la medición de la temperatura interior y exterior de temperatura del aire y de la relación la humedad.

Mediante la investigación se logró demostrar la eficiencia de los techos verdes en la regulación de la temperatura o el microclima, teniendo en cuenta unas consideraciones de vital importancia; Tal es el caso de la variación térmica en relación a los diferentes tipos de vegetación, ya que esta mientras sea más espesa y oscura muestra mejor eficiencia, además que se disminuye la transferencia de calor entre los dos medios (externo e interno) de la edificación y un mayor ahorro de energía en las edificaciones con el sistema construido, este ahorro fue del 37%, en el día y 48% en la noche. (A.Niachou, 2001)

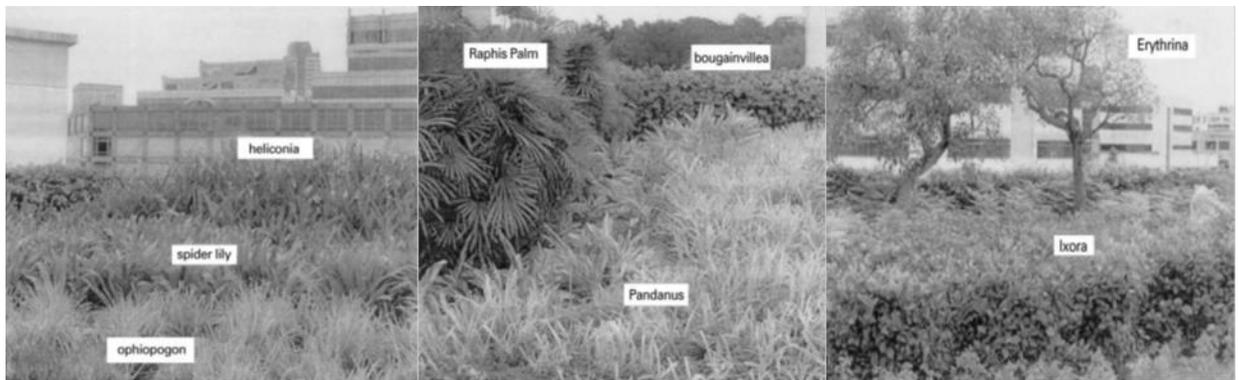
Así mismo, en el año 2001 en Singapur se realizó un estudio en el Departamento de Construcción de la Escuela de Diseño y Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Singapur, con el fin de investigar los beneficios térmicos de los techos verdes en ambientes tropicales. La investigación se basó en analizar específicamente tres aspectos relacionados a las condiciones de los techos: la reducción de las temperaturas de las superficies causadas por diferentes plantas (con diferente índice de área foliar), la reducción de la ganancia de

calor causado por las plantas y variaciones de las variables ambientales causadas por las plantas en la azotea. (Nyuk Hien Wonga, 2003)

La medición de campo se llevó a cabo en una azotea de un edificio comercial de baja altura en Singapur y el esquema experimental de la azotea se muestra en la Figura 6. Las mediciones no fueron influenciadas por las sombras o radiación solar rechazada, ya que no hay edificios altos alrededor. El jardín de la azotea era intensivo, este cobijó la siembra de hierba, arbustos y árboles, así como el pavimento de acceso por los visitantes.

Para el monitoreo del jardín en la azotea se utilizaron: dos juegos de registradores de datos de Yokogawa, DAQstation DX200, cables termopares para la medición de la temperatura en la superficie, dos juegos de dispositivos de almacenamiento de datos, Babuc A y sensores para la medición de las temperaturas del aire en el ambiente, temperaturas globales, humedad relativa y velocidad del viento y dos juegos de medidores de radiación solar.

*Figura 6. Esquema experimental del jardín en la azotea.*



Fuente: (Nyuk Hien Wonga, 2003)

El análisis de los datos cuantitativos obtenidos en esta investigación, logro demostrar la eficiencia en la disminución de temperatura bajo el jardín, esta disminución fue alrededor de 4.2°C en el aire, esta eficiencia varía según la densidad de las plantas, ya que las temperaturas más bajas se midieron bajo el follaje espeso, mientras las temperaturas más altas se tuvieron

bajo una escasa vegetación o solo tierra, además la transferencia de calor por el techo desnudo fue mayor que a través de los techos plantados y el solo suelo.. (Nyuk Hien Wonga, 2003)

Con el fin de tener una mayor organización con respecto a las investigaciones enfocadas en la evaluación de los parámetros hidráulicos y térmicos de Techos Verdes construidos e implementados a nivel nacional e internacional, se elaboró una serie de tablas a partir de la recopilación bibliográfica exhaustiva, donde se lista la información general de dichas investigaciones; Las tablas se encuentran en los anexos de este proyecto de investigación, detallados de la siguiente forma: Información concerniente a Manuales de Diseño en el Anexo 1, información general de artículos internacionales encontrados en las bases de datos de la Universidad de Cartagena, en el Anexo 2, información general de artículos internacionales encontrados en páginas web en el Anexo 3, información general de artículos nacionales encontrados en páginas web en el Anexo 4.

Teniendo en cuenta los estudios mencionados anteriormente en este numeral y demás relacionados a los objetivos de este proyecto de investigación, fueron listadas las investigaciones a nivel mundial que tienen relación a la gestión de agua en la Tabla 1 y las investigaciones que tienen relación con el efecto Térmico en la Tabla 2, en las tablas se detallan la localización, capacidad y tiempo de retención, disminución de temperatura interna, disminución de caudal pico, tipo de vegetación y clima.

Las investigaciones enfocadas en la determinación del efecto térmico y captación de escorrentía producida por Techos Verdes son numerosas y la información obtenida sumamente valiosa, sin embargo, son muy escasas aquellas realizadas en Colombia y más aún en Cartagena de Indias, la cual aunque posee un clima similar a otros sitios de estudio, posee regímenes climatológicos y vegetación nativa distinta, por lo que el desarrollo de investigaciones en este es de gran importancia.

*Tabla 1. Sumario de investigaciones y sus resultados concernientes a la gestión de agua de los Techos Verdes*

Referencia	Localización	Disminución de Escorrentía (%)	Disminución de Caudal Pico (%)	Tiempo de retención (min)	Tipo de Vegetación
<b>Tipo de Clima: Templado</b>					
(Ju Young Lee, 2015)	Corea, Japón	13.8–34.4 (Suelo: 15 cm) 42.8–60.8 (Suelo: 20 cm)	18 - 29 (Suelo: 15 cm) 9 - 20 (Suelo: 20 cm)	-	Sedum
(Nawaz, McDonald, & Postoyko, 2015)	Leeds, Reino Unido	Promedio: 66	-	95	Variedad de especies de Sedum
(Harper, Limmer, Showalter, & Burken, 2014)	Missouri, EEUU	40 (Sin vegetación) 60 (Con vegetación)	-	-	Mezcla de 18 especies de Sedum
(Getter, Rowe, & Andresen, 2007)	Michigan, EEUU	Promedio: 85.6 (Pendiente: 2%)	-	-	Xero Flor XF301 (Mezcla de 11 especies de Sedum)
(Hakimdavar, Culligan, Finazzi, Barontini, & Ranzi, 2014)	New York, EEUU	Promedio: 85 (Prec.<20mm) 48 (20mm≤Prec.≤40mm) 32% (Prec>40mm)	Promedio: 89 (Prec.<20mm) 62 (20mm≤Prec.≤40mm) 51 (Prec>40mm)	-	Mezcla de 13 especies de Sedum
(Gregorie & Clausen, 2011)	Connecticut, EEUU	51.4	-	-	Mezcla de Sedum: album, foresterianum, kamtschaticum, floriferum, reflexum y spirium

Fuente	Localización	Disminución de Escorrentía (%)	Disminución de Caudal Pico (%)	Tiempo de retención (min)	Tipo de Vegetación
<b>Tipo de Clima: Subtropical Húmedo y Sub-tropical</b>					
(Gwendolyn & Wong, 2014)	Hong Kong, China	Promedio: 38.9 (Sustrato: 4 cm) 43.2 (Sustrato: 8 cm)	Promedio: 40.6 (Sustrato: 4 cm) 53.0 (Sustrato: 8 cm)	Promedio: 48 (Sustrato: 4 cm) 72 (Sustrato: 8 cm)	Arachis pintoi
(Fassman-Beck, Voydel, Simcock, & Hong, 2013)	Auckland, Nueva Zelanda	83-92 (Primavera) 56% (Comparado con un techo convencional)	Promedio: 62-98 (Comparado con un techo convencional)	-	20 especies nativas y 18 no nativas de Sedum
(Voyde, Fassman, & Simcock, 2010)	Auckland, Nueva Zelanda	Promedio: 82	Promedio: 93	-	5 especies de Sedum: spurium, almbu, rubroctinctum, rupestre y mexicanum
(Jim, 2012)	Texas, EEUU	Promedio: 78 (La presencia de T. calycinum mejoró la retención en 7.5%)	-	-	Sedum kamschaticum, Delosperma cooperi and Talinum calycinum con Phemeranthus calycinus
(Hathaway, Hunt, & Jennings, 2008)	Carolina del Norte, EEUU	64	77 - 78	30	Delosperma nubigenum, Sedum reflexum, Sedum sexangulare, Sedum album, Sedum album f. murale, y Sedum spurium
(Uhl, 2008)	Edinburgh, Scotland,	Primavera: 16 - 31	75	-	Apta para Techos Extensivos
(Carroll, 2010)	Glasgow, Reino Unido	70 - 80	-	9	Xero Flor XF301 (Mezcla de 11 especies de Sedum)
(Moran, Hunt, & Jennings, 2003)	Carolina del Norte, EEUU	60	85	-	Sedum album, Sedum album murale, Sedum floriferum, Sedum reflexum, y Sedum sexangulare
<b>Tipo de Clima: Tropical</b>					
(Van Spengen, 2010)	Ciudad de Singapur, Singapur	90 (Prec. <2.5mm) 75 (2.5mm<Prec. <10mm) 45 (10mm<Prec. <20mm) 58 (>20mm)	93 (Prec. <2.5mm) 79 (2.5mm<Prec. <10mm) 63 (10mm<Prec. <20mm) 57 (>20mm)	-	Sedum Mexicanum

Tabla 2. Sumario de investigaciones y sus resultados concernientes a efecto Termico de los techos verdes

Referencia	Localización	Disminución de Temperatura Interna (°C)	Tipo de Vegetación
<b>Tipo de Clima: Subtropical Húmedo y Sub-tropical</b>			
(C.Y, 2012)	Hong Kong, China	Grama: $\leq 1.7$ (Arbusto)      0.8	Zoysia tenuifolia, Arachis pintoi y Duranta repens L.
<b>Tipo de Clima: Subtropical Húmedo y Sub-tropical</b>			
(Xiao , Lin, Han, & Zhang, 2014)	Shangai, China	$\leq 2$	-
	Shangai, China	1	-
	XingTai, China	Nublado: $\leq 2.25$ y 1.32 (Prom.) Despejado: $< 2.62$ y 1.72 (Prom.)	-
	Chongqing, China	Nublado: 0.30 (Prom.) Despejado: 0.20 (Prom.)	-
<b>Tipo de Clima: Subtropical Húmedo y Sub-tropical</b>			
(Simmons et al., 2008)	Texas, EEUU	$< 5$	
<b>Tipo de Clima: Cálido</b>			
(de Rhodes Valbuena, 2012).	Honda, Tolima	0.94 (Respecto al ambiente exterior)      0.56 (Respecto a un techo convencional)	Arachis pintoi, Bougainvillea glabra, Chlorophytum comosum "Variegata", Passiflora quadrangularis y Cucumis melo

## 2.2 MARCO TEÓRICO

Los Techos Verdes son un SUDS compuesto por una serie de capas ubicadas sobre el techo de una estructura con el fin de interceptar y retener agua lluvia para disminuir el volumen de escorrentía y atenuar el flujo, mitigar el fenómeno de isla de calor y mejorar las condiciones ambientales, en términos de confort humano y biodiversidad (Woods Ballard, y otros, 2007). El cumplimiento de sus funciones son desempeñadas gracias a su capacidad de: 1) Estanqueidad, 2) Drenaje, 3) Retención de agua, 4) Estabilidad Mecánica, 5) Nutrición y 6) Filtración. (Secretaria Distrital de Ambiente, 2011). Como complemento a lo anterior, en este numeral se comentan las teorías referentes a las características, clasificación, diseño y construcción, gestión del drenaje y efecto en la temperatura de los Techos Verdes.

### 2.2.1 Clasificación de los Techos Verdes

Se pueden clasificar de acuerdo con su espesor, tipo de vegetación, accesibilidad, necesidad de mantenimiento y origen en intensivo, semi-intensivo y extensivo, los cuales se diferencian entre si principalmente por el espesor del sustrato y el tipo de vegetación (Carroll, 2010). En la Tabla 3 se resumen las características de cada uno de los tipos de techos verdes con el fin de comparar sus propiedades y determinar con mayor facilidad sus ventajas y desventajas.

*Tabla 3. Comparación de los distintos tipos de techo verde.*

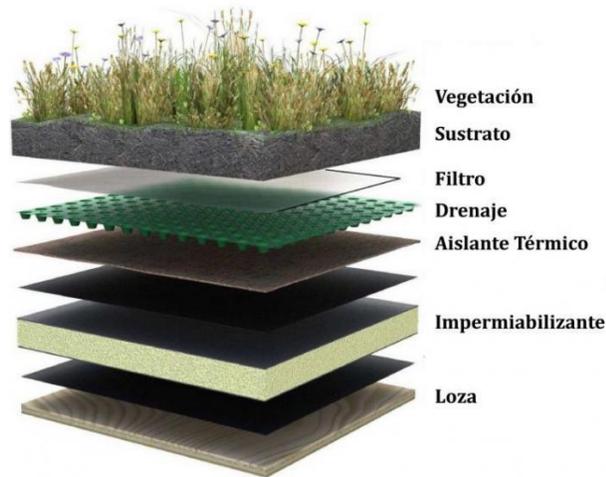
	<b>Techos Verdes Extensivos</b>	<b>Techos Verdes Semi-Intensivos</b>	<b>Techos Verdes Intensivos</b>
<b>Mantenimiento</b>	Bajo	Periódico	Alto
<b>Irrigación</b>	No	Periódico	Regular
<b>Comunidades de Plantas</b>	Musgo, Hierbas y Grama	Gramma, Hierbas y Arbustos	Césped, Arbustos y Arboles
<b>Profundidad del Sustrato</b>	2-20cm	15-50cm	15-150cm
<b>Peso</b>	60 kg – 150kg/m <sup>2</sup>	120 kg -200 kg/m <sup>2</sup>	180kg – 500kg/m <sup>2</sup>
<b>Costo</b>	Bajo	Medio	Alto
<b>Uso</b>	Capa de Protección Ecológica	Techo Verde Diseñado	Parque/Jardín

Fuente: (Carroll, 2010)

### 2.2.2 *Diseño y Construcción de Techos Verdes*

Las capas que componen el sistema de techo verde son desde la parte más baja a la más alta respectivamente: 1) Loza, 2) Impermeabilizante, 3) Aislante Térmico, 4) Drenaje o Capa drenante (geo-compuesta o agregado permeable), 6) Filtro o Geotextil filtrante, 7) Sustrato y 8) Vegetación, como se ilustra en la Figura 7. (arquitecturayempresa, 2014)

*Figura 7. Esquema general de los componentes de un techo verde.*

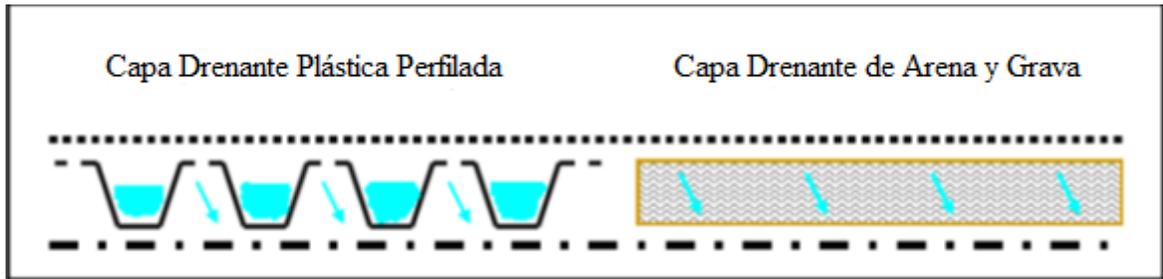


**Fuente:** (arquitecturayempresa, 2014)

#### 2.2.2.1 *Capa Drenante*

Su propósito es en conjunto con el sustrato, controlar las propiedades de retención y drenaje de agua en el techo verde. Debe tener la suficiente capacidad de flujo para llevar el volumen de agua necesario por el techo y prevenir encharcamientos sobre la membrana, y las condiciones de drenaje adecuadas para almacenar agua en tiempos de sequía y evitar la muerte de las plantas (Carroll, 2010). Las capas drenantes pueden ser materiales granulares como grava y arena, arcilla expansiva y pizarra o roca volcánica y piedra pómez o sistemas modulares compuestos de láminas de plástico perfiladas como se ilustra en la Figura 8.

Figura 8. Elementos típicos usados como capa drenante.



Fuente: Basado en (Carroll, 2010)

#### 2.2.2.2 Sustrato

Es el medio apto para el crecimiento de las plantas gracias a que le brinda estabilidad mecánica, nutrientes, retención y drenaje de agua, el cual en lo posible debe tener las características óptimas para no realizar procesos de irrigación y retenerla cantidad de aire requerida. Esta capa debe tener un espesor de entre 10 y 25 cm por lo menos y estar compuesta por suelos de baja densidad con buena retención de agua y mezclas de materia orgánica y mineral, como arcilla expansiva y piedra pómez triturada (CIRIA, 2007), sin embargo, el uso de tejidos de fibras o laminas sintéticas conformadas por felpa es una opción eficiente (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011). En caso de usar suelo, sus especificaciones se muestran en la Tabla 4 de manera detallada.

Tabla 4. Especificaciones del suelo de sustrato para techos verdes extensivos.

<b>Propiedad Física</b>	Sistema de una capa	Sistema multi-capa
Retención de agua	Min 20%	Min 35%
Permeabilidad de agua	Min 60mm/min	Min 0.6mm/min
Contenido de aire (Totalmente saturado)	Min 10%	Min 10%
<b>Propiedad Química</b>		
Ph	6.5 a 9.5	6.5 a 8
Contenido de sal de agua extraída	Max 1 g/l a 8%	
Contenido inicial de materia orgánica	4 a 8%	
Nitrogeno (N)	Max 80 mg/l	
Fosforo (P2O5)	Max 200 mg/l	
Potasio (K2O)	Max 700 mg/l	
Magnesio (Mg)	Max 160 mg/l	

Fuente: (CIRIA, 2007)

### 2.2.2.3 Vegetación

Es el componente más activo del techo verde y su escogencia depende principalmente del tipo de techo verde, condiciones medioambientales tales como temperatura del aire y periodos de lluvia y sequia de la zona, disponibilidad de nutrientes, biota local y condiciones estéticas requeridas (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014). Sus atributos principalmente deben garantizar su supervivencia, por lo que se recomienda que esta sea (CIRIA, 2007):

- Perenne
- Tolerante a la sequía y que necesite poca o ningún tipo de irrigación después de su establecimiento
- Adaptable en suelos bien drenados
- Auto-sostenible, que no necesite fertilizantes, pesticidas o herbicidas y requiera poco mantenimiento
- Rápida colonización
- Hábil para soportar calor, frio y fuertes vientos

- Tolerante a suelos pobres y condiciones ácidas
- Resistente al fuego

### 2.2.3 *Gestión de Drenaje*

La urbanización aumenta el total de estanqueidad y disminuye las tasas de infiltración, lo que resulta en incremento de los volúmenes de precipitación-escorrentía y descargas máximas. El aumento de las descargas de lluvia-escorrentía y caudal pico pueden causar inundaciones aguas abajo y se pueden deteriorar los cuerpos de aguas subterráneas y superficiales a través de la infiltración de sustancias contaminadas de la superficie y por fugas de conductos de drenaje con fugas y desbordamientos de alcantarillado combinado, respectivamente. Algunos de estos problemas pueden ser resueltos por la expansión y el buen mantenimiento de los sistemas de drenaje de aguas pluviales tradicionales, sin embargo, estas soluciones son costosas y podrían entrar en conflicto con otros objetivos espaciales y transferir los problemas de cantidad de agua a las zonas bajas. Los techos verdes pueden proporcionar una solución más sostenible contra el aumento de los volúmenes de escorrentía y descargas máximas. Varias investigaciones científicas demuestran que los techos verdes aumentan efectivamente la retención de lluvia, reducen el pico de escorrentía y extienden el retraso de la escorrentía. Para tener un enfoque más específico en la influencia de los techos verdes serán examinados los siguientes cambios en la relación precipitación-escorrentía: (Spengen, 2010)

Los procesos de almacenamiento a los que se da lugar en un Techo Verde al recibir agua proveniente de precipitación se llevan a cabo en tres sitios de almacenamiento, que son el almacenamiento superficial, la detención y el almacenamiento subsuperficial (Locatelli, y otros, 2014). Estos se caracterizan por:

- Almacenamiento Superficial: Corresponde a la precipitación interceptada por la capa vegetal, la cual es restablecida a través de la evaporación, y al ser excedida se infiltra al almacenamiento subsuperficial.

- Almacenamiento Subsuperficial: Corresponde al volumen de agua total que puede ser almacenado tanto por el sustrato como la capa drenante, sin embargo, esta última generalmente no es diseñada para ofrecer almacenamiento. Su capacidad de almacenamiento es restablecida por la evapotranspiración o conducida como almacenamiento por detención.
- Almacenamiento por detención: Es el exceso de agua que no puede ser almacenado por el techo verde por gravedad, y por consiguiente es conducida como flujo subsuperficial a través de la capa drenante, así mismo, al ser excedida su capacidad el agua es conducida como escorrentía efluente del sistema.

#### 2.2.4 Rendimiento en retención de aguas pluviales por los techos verdes.

El rendimiento de los techos verdes se expresa en la mayoría de los casos en la retención de agua lluvia y la disminución de escorrentía superficial urbana, para calcular este rendimiento se utiliza el indicador de rendimiento de retención absoluto (RPI), este indicador relaciona el volumen de precipitación y el volumen de escorrentía una vez que pasa el sistema retenedor (Spengen, 2010). Este indicador se expresa en la ecuación 1.

$$RPI = V_p - V_e$$

*Ecuación 1. Indicador de rendimiento de retención absoluto.*

Dónde:

$V_p =$  Volumen de precipitación

$V_e =$  Volumen de escorrentía

Para obtener el porcentaje de retención del sistema se utiliza la ecuación 2.

$$RPI \% = \left(1 - \frac{V_e}{V_p}\right) * 100$$

*Ecuación 2. Porcentaje de retención de escorrentía.*

### 2.2.5 Rendimiento de los techos verdes con descarga máxima de aguas pluviales.

La reducción de la descarga pico o atenuación del hidrógrama es un objetivo muy importante en la gestión de aguas pluviales ya que podría permitir una reducción del tamaño de las estructuras de drenaje urbano y proporcionar la capacidad para un desarrollo urbano más sostenible para el futuro. La reducción de la descarga pico (PDPI) puede expresarse como una reducción de la descarga absoluta, calculada mediante la ecuación 3, a su vez, este puede ser comparado con el pico de la precipitación o la descarga de techo máximo de referencia mediante la ecuación 4. (Spengen, 2010)

$$PDPI = P_0 - f_{max}$$

*Ecuación 3. Reducción de la descarga pico.*

Dónde:

$P_0 =$  flujo pico de referencia o de precipitación

$f_{max} =$  flujo pico de techo verde

$$PDPI \% = \left(1 - \frac{f_{max}}{P_0}\right) * 100$$

*Ecuación 4. Porcentaje de reducción de la descarga pico.*

### 2.2.6 Rendimiento de los techos verdes en el tiempo de detención de aguas pluviales.

La retención o demora de lluvia-escorrentía proporcionada por los techos verdes puede ser caracterizado como la diferencia de tiempo entre el inicio de la escorrentía del techo verde o el techo de referencia y el inicio de la precipitación. Para la medición del tiempo de retención existe un indicador que se denomina Indicador de rendimiento de retención (DPI), y se expresa matemáticamente mediante la ecuación 5. (Spengen, 2010)

$$DPI = T_{ie} - T_{ip}$$

*Ecuación 5. Indicador de rendimiento de retención.*

Dónde:

$T_{ie}$  = *Tiempo de inicio de la esorrentia*

$T_{ip}$  = *Tiempo de inicio de la precipitación*

### *2.2.7 Efecto Térmico y Energético.*

Los techos verdes influyen positivamente en la regulación del calor dentro de una vivienda y en una escala urbana reduciendo el fenómeno isla de calor, debido a que los techos verdes suavizan las variaciones de temperatura en una escala diaria, además suministra un aislamiento que mejora el desempeño térmico de los espacios interiores, reduciendo el consumo energético de los sistemas de climatización ya que reducen el deseo de aparatos de aire acondicionado en verano y calefacción en invierno. (Secretaria Distrital de Ambiente, 2011)

### *2.2.8 Rendimiento en la disminución de la temperatura debajo del sistema de techos verdes*

El rendimiento de los Techos verdes en la disminución de la temperatura se basa principalmente en la variación de la temperatura del interior con respecto a la temperatura ambiente, debido a que actúan como sistemas de aislamiento, reduciendo el flujo de calor a través del techo (Palomo del Barrio, 1997).

La temperatura del sistema está ligado factores externos, que son la radiación solar, el flujo de radiación térmica proveniente del cielo, la temperatura, humedad y velocidad y dirección del viento, y a factores internos, reguladas por el estado térmico al interior de este (Palomo del Barrio, 1997).

Los tres componentes del sistema que intervienen usualmente en el efecto térmico proporcionado por los Techos Verdes son la capa vegetal, el sustrato o suelo y la estructura de soporte del techo, a través de los siguientes procesos:

- **Capa Vegetal:** A través de las hojas tienen lugar la absorción de radiación solar, el intercambio de ondas largas con el cielo y el terreno, la evapotranspiración, transferencia de calor por convección con el aire (Palomo del Barrio, 1997). Estos procesos dependen de la cobertura proporcionada por las plantas, su reflectividad espectral, que es su capacidad de reflejar la radiación incidente y capacidad de transpiración y evaporación (Zhao, Tabares, Srebric, & Komarneni, 2014).
- **Sustrato:** El calor es transferido por medio de la conducción, convección y transferencia de calor latente, que es el calor liberado cuando el agua se evapora, y varía con las propiedades térmicas de estos, que son el calor específico y su conductividad térmica.
- **Estructura de Soporte:** Las propiedades que regulan el flujo de calor y cambio de temperatura a través de esta capa son la conductividad térmica del material y el calor específico.

### 2.3 ANTECEDENTES

En Cartagena de Indias han existido diversos problemas relacionados a constantes inundaciones desde hace muchos años, debido principalmente al cambio climático y los efectos de la urbanización. Esta situación ha sido reconocida por la administración local de la ciudad, la Cámara de Comercio, el MADS y el INVEMAR, así como otras instituciones, las cuales han planteado planes de solución en cumplimiento del Plan de Desarrollo 2011-2014, como la “Integración de la Adaptación al Cambio Climático en la Planificación

Territorial y Sectorial de Cartagena de Indias” (INVEMAR-Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias- CDKN, 2012). Dicha problemática también ha sido enunciada en el Plan Maestro de Drenajes Pluviales de Cartagena de Indias, que tiene como función principal plantear una solución a los problemas de inundación identificados en el casco urbano actual y la zona de expansión de la ciudad.

Como una solución a los problemas de drenaje e incremento de temperatura en muchas ciudades a nivel mundial se ha contemplado la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). A nivel nacional, la Secretaría Distrital de Ambiente de la ciudad de Bogotá D. C. desarrolló en 2011 el documento técnico denominado Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, en el cual se contribuye a la adopción de los SUDS por medio de la descripción de sus componentes y aplicaciones de los distintos sistemas existentes. (Ambiente, 2011)

Entre los SUDS se encuentran los sistemas de techos verdes, los cuales han sido construidos desde hace muchos años. El primer proyecto fue los jardines colgantes de Babilonia, construidos en el siglo VI a. C en la ciudad de Babilonia a orillas del río Éufrates y considerados una de las siete Maravillas del Mundo Antiguo (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014), sin embargo, simplemente fueron creados por su beneficio estético. Los techos verdes modernos, enfocados en sus características funcionales fueron desarrollados en Alemania a principios de la década de 1970, y posteriormente se han desarrollado una serie de ensayos de prueba y error, códigos y técnicas industriales que han resultado en gran cantidad de publicaciones relacionadas con el diseño, materiales de cubierta, sustrato, plantas y demás (Spengen, 2010).

La implementación de techos verdes principalmente se ha enfocado en su rendimiento en la disminución de la escorrentía superficial y la temperatura, tanto a nivel micro como macro climático, dando lugar a una serie de investigaciones alrededor del mundo. Según la base de

datos de Greenroofs.com (2015) existen aproximadamente 1.595 proyectos de techo verde que en conjunto aportan una cobertura de 3.071.6 m<sup>2</sup>. Entre los proyectos emblemáticos a nivel mundial se encuentran el edificio de la Alcaldía de Chicago, Estados Unidos, mostrado en la Figura 9, construido en el 2001 y con una cobertura de 1855.93 m<sup>2</sup> (Greenroofs.com, 2015), TheSchool of Art, Design and Media de la Universidad Tecnologica de NanYang en Singapur, el Conservatorio y Jardín Botánico Phipps, certificado con la clasificación LEED Platinum (Evolve environment architecture, 2015).

En Colombia se han desarrollado desde 2006 hasta 2009 avances en investigación experimental a nivel de postgrado en la evaluación de la tecnología de techos verdes en la ciudad con el fin de determinar parámetros técnicos para su aplicabilidad por parte de la Universidad Nacional de Colombia (Secretaria Distrital de Ambiente, 2011).

En el municipio de Honda, Tolima se implementó un modelo de techo verde para examinar su uso como una estrategia frente al calentamiento global considerando las variables de temperatura dentro de la casa y en el techo, y encontró una atenuación térmica de la temperatura promedio dentro de la casa de 0,52°C en comparación con la que no tenía techo verde y de 5,82°C en el techo (de Rhodes Valbuena, 2012). En otra de las investigaciones de importancia se elaboró un análisis comparativo de los beneficios técnicos en la implementación de techos verdes en Bogotá en comparación con los beneficios técnicos actuales (Cristancho, 2001; de Rhodes Valbuena, 2012).

En la ciudad de Santa Marta se hizo una revisión profunda de las experiencias y resultados de numerosas investigaciones de los Techo Verde como herramientas de gestión ambiental, en la que se destacó a estos como una herramienta viable para su implementación a gran escala en el sector El Rodadero, sin embargo, la voluntad para su construcción es poca debido a las barreras económicas, naturales, psicológicas, etc. , fundamentadas en la carencia a nivel local de estudios que respalden su utilidad. (Zielinski, Garcia Collante, & Vega Paternina, 2012)

*Figura 9. Edificio de la Alcaldía de Chicago.*



Fuente: (Alpha Coders, 2015)

En Bogotá a partir de 2009 se ha dado lugar a la difusión de este sistema en los medios de comunicación, como periódicos, televisión, revistas, catálogos comerciales, etc., así como el surgimiento de empresas locales y extranjeras dedicadas al diseño, instalación y mantenimiento de techos verdes (Secretaria Distrital de Ambiente, 2011). Incluso se tiene un mapa con un registro nacional y mundial de techos verdes y jardines verticales, con el apoyo del Observatorio Ambiental (OAB) (Guía Bogota, 2014).

Entre los proyectos llevados a cabo en la ciudad de Bogotá se encuentran el BTS-2 con un área de 245.4 ft<sup>2</sup> construido en el año 2013, el Palacio Cardenalicio, un antiguo palacio sacerdotal revestido con cubierta verde, plantado con especies nativas de la sabana de Bogotá con una área cubierta de 750 m<sup>2</sup> con el fin de ayudar a mitigar el efecto isla de calor, reducir la escorrentía pico hasta un 90% y aumentar la biodiversidad de la zona, el Colegio San José

de Barranquilla, la cual implemento este sistema para conseguir reducción del consumo de energía y ausencia de isla de calor. (Arkiblog, 2014)

Para el diseño y construcción de techos verdes en la ciudad de Bogotá se desarrolló la Guía de Techos Verdes en Bogotá en el año 2011 y la guía práctica Techos Verdes y Jardines Verticales en el año 2014 por parte de la Secretaría Distrital de Ambiente, las cuales contienen requerimientos de tipo técnico y de planificación de un Techo Verde.

Teniendo en cuenta la acogida de los Techos Verdes en Bogotá, la cual es muy probablemente aquella con mayor desarrollo de este SUDS, respalda el hecho de que ya se tienen antecedentes nacionales que respaldan su eficiencia, así como el desarrollo económico, psicológico y político necesario para este.

En la ciudad Cartagena de Indias se está avanzando en campañas de sostenibilidad, y entre los proyectos se firmó un convenio con el sector de la construcción para una construcción más limpia, para construir jardines verticales y techos verdes en sitios estratégicos de la ciudad. (EL UNIVERSAL, 2013). Sin embargo, aún no se tiene registro de un proyecto de techos verdes y su desarrollo a nivel científico es muy poco, tanto así que no se tienen antecedentes de investigaciones que evalúen la capacidad de los mismo en reducción de temperatura y gestión del drenaje y estos serían una buena opción para crear sistemas de drenaje y de desarrollar maneras de mitigar las altas temperaturas presentes siguiendo las ideologías sostenibles.

### 3 METODOLOGÍA

El tipo de investigación realizada es de carácter experimental teniendo en cuenta que esta propuesta posee un enfoque mixto de dos etapas: cualitativa y cuantitativa; como primera etapa o etapa cualitativa se elaboró un análisis de la información secundaria hallada para su análisis e interpretación, la cual comprende documentación que se refiera a: manuales de diseño, normativas de diseño y construcción, metodologías internacionales concernientes a la construcción y diseño, implementación de los techos verdes a nivel internacional y nacional, resultados obtenidos a partir de su implementación en el caso de evaluación de las escorrentías y mitigación de la temperatura interna; todo esto utilizando medios físicos y magnéticos los cuales están descritos en el estado del arte del presente proyecto de investigación. La segunda etapa o etapa cuantitativa corresponde a información relacionada con la construcción, operación del sistema, mediciones de los parámetros, obtención de resultados y comparación con los resultados de investigaciones relacionadas.

#### 3.1 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LA VEGETACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TECHO VERDE

Para la selección de la vegetación implementada como capa de los techos verdes se realizó una revisión bibliográfica de la clasificación de plantas existentes en la ciudad de Cartagena y se escogió una muestra de plantas nativas teniendo en cuenta los siguientes criterios: clasificadas entre arbustos y plantas pequeñas, buena capacidad de absorción, resistencia a periodos largos de sequía, agradables a la vista y capacidad de supervivencia bajo largos periodos de intensa radiación solar.

Gracias a las asesorías suministradas por el Biólogo Reynaldo Fajardo, se pudo realizar una preselección, con lo que se estableció un grupo de plantas comunes nativas de la región que podrían ser implementadas en el sistema de techo verde debido a cumplir con los criterios anteriormente establecidos. Dicho grupo está contemplado en la Tabla 5.

*Tabla 5. Listado de plantas nativas aplicables a techos verde*

Nombre Común	Nombre Científico	Capacidad de resistencia a periodos largos de sequia
ManíForrajero	ArachisPintoi	Moderada
Duranta	Durante Golden	Buena
Veranera	BoungaivilleaGalbra	Buena
Cruz de Malta	IxoraCoccinea	Moderada
BarquitoMorado	CommelinaNudiflora	Buena
Verdolaga	PortulacaOleracea	Buena

*Fuente:* (Fajardo, 2015)

### *3.1.1 Bio-ensayo para la selección del tipo de vegetación*

La selección de los dos tipos de vegetación con mayor viabilidad para ser integradas en el sistema de techo verde bajo las condiciones ambientales y del sistema, de acuerdo con las características mencionadas en el párrafo 3.2.1 se desarrolló a través de un bio-ensayo, en el que se evaluó la resistencia a la sequía de un espécimen de cada una del grupo mencionado en la Tabla 5, las cuales fueron plantadas y sometidas a evaluación en bolsas plásticas rellenas de suelo agrícola en Cartagena de Indias. El bio-ensayo consistió en el monitoreo diario de las características físicas de la planta ante un periodo de sequía, es decir, con completa ausencia de riego, comprendido por el tiempo requerido para que cada espécimen alcanzara la pérdida de su vitalidad; por otra parte, se tuvo en cuenta como factores de escogencia sus características estéticas y tamaño.

## **3.2 CONSTRUCCIÓN DE TECHOS VERDES Y CUBIERTA DE CONCRETO CONVENCIONAL A ESCALA PILOTO.**

Esta etapa hace referencia a la construcción de dos techos verdes y una cubierta de concreto a escala piloto; con base en un esquema general del diseño de un sistema de techo verde, el cual fue tomado de *THE SuDS MANUAL 2007*, cuyo autor es CIRIA, y la *GUIA DE TECHOS*

*VERDES EN BOGOTA 2011*, cuyo autor es la Secretaría Distrital de Ambiente de la Alcaldía de Bogotá D.C, Colombia. Además, las características del diseño de los techos verdes a escala piloto se describen en este capítulo.

Se construyeron tres plantas piloto, dos correspondiente a techo verde y una con techo de concreto convencional, que fue implementada como techo de referencia, todo esto en la cubierta del edificio de laboratorios el Campus de Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena. Cada planta piloto está compuesta por su respectivo techo y una estructura de soporte.

Cada planta piloto posee un techo de 0.30 m de altura, 1.05 m de largo y 1.0 m de ancho y un soporte, conformado por pórticos metálicos de 1.10 m de altura, que constituyen cuatro puntos de apoyo amarrados entre sí, de 0.80 m de altura, en la cual se situó cada de techo. Además, para el desagüe de la escorrentía proveniente de cada una de los techos se construyó una estructura similar a una canaleta, unido al techo, de 0.05m de largo y 1.0 m de ancho para conducir el flujo proveniente del agua infiltrada en cada uno al punto de desagüe.

El modelo en planta de cada planta piloto y su respectiva estructura de apoyo y desagüe está representado en la Figura 10, y las vistas frontal de uno del modelo de techo a escala piloto en la Figura 12, así mismo en la Figura 13 son ilustrados cada uno de los sistemas a escala piloto, siendo el modelo de la izquierda el techo verde compuesto por Duranta (*Durante Repens*) y el del centro el compuesto de Verdolaga (*Portulaca Oleracea*), y a la derecha la cubierta convencional de concreto.

La planta piloto de concreto convencional o de referencia está conformada únicamente por una plantilla de concreto de 0,05m de espesor. En cuanto a los techos verdes, estos están conformados en orden descendente por la vegetación, conformado cada uno por una de las dos especies de planta nativa de la ciudad de Cartagena de Indias escogidas previamente, un sustrato con un espesor de 0.15 m con las propiedades granulométricas mostradas en el

Anexo 5, compuesto por una mezcla de 50% de ladrillo molido de entre 2 y 10 mm de diámetro y 50% de humus de lombriz sólido con las propiedades mostradas en el Anexo 6, un geotextil filtrante NT1600, el cual es no tejido y permeable con el fin de separar y retener el material fino, una capa drenante de 0.10 m de espesor conformada por grava de menos de 3/4" de diámetro y una tasa de aplicación mayor a 5 l/m<sup>2</sup>/s, para conducir el agua retenida al canal de desagüe, y una plantilla de concreto de 0,05 m de espesor; Su conformación se detalla en la Figura 11. En el Anexo 7 se ilustra la etapa constructiva de los sistemas de techo verde.

Figura 10. Vista en planta de los modelos de techo a escala piloto.

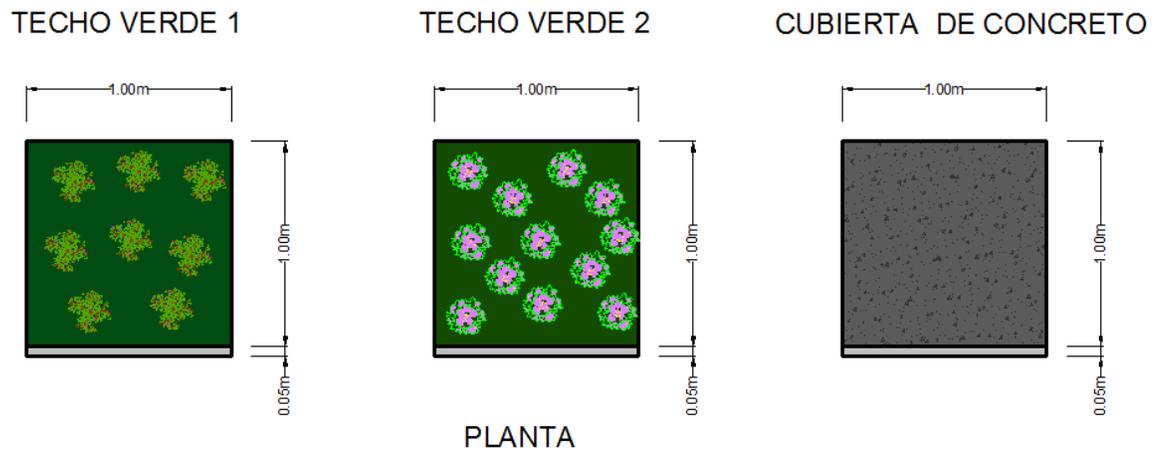
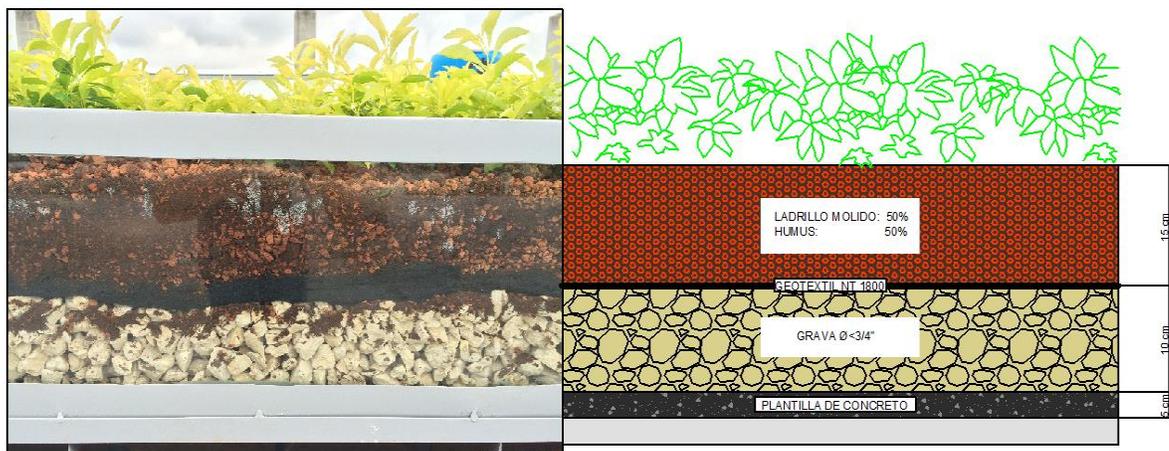


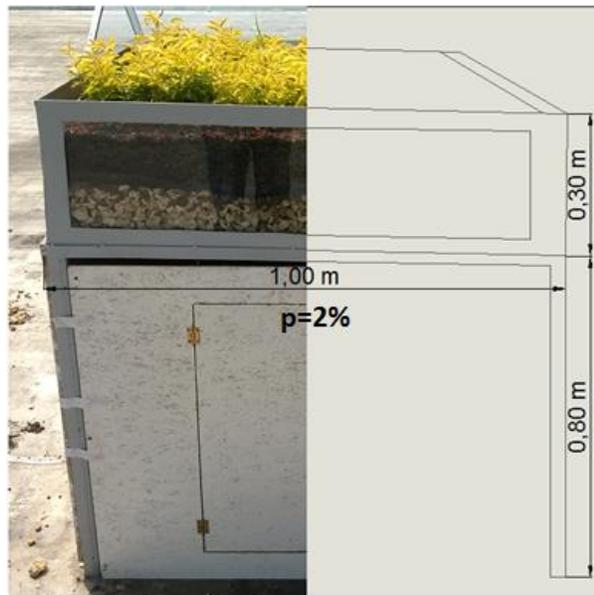
Figura 11. Componentes generales de cada uno de los sistemas de techo verde a escala piloto.



Para la simulación de una vivienda convencional a escala fue rodeado cada soporte con paneles de madera de 0.80 m de ancho y 1.00 m de largo (Ver Figura 12 y Figura 13) con el fin proveer cobertura de la parte inferior de cada techo, es decir, entre la parte baja del techo y el terreno, y así garantizar que la temperatura debajo de cada techo no fue afectada directamente por los factores ambientales externos.

Para el drenaje de la escorrentía sub-superficial de cada uno de los techos fue empleada una manguera plástica instalada en la parte baja del canal o punto de desagüe por medio de un orificio para conducir el efluente hasta el instrumento destinado a la medición de escorrentía, descrito posteriormente. Por otra parte, en el Anexo7 son detalladas cada una de las fases de construcción de los sistemas de Techo Verde.

*Figura 12. Vista frontal de uno de uno de los modelos de techo a escala piloto.*



*Figura 13. Vista frontal de los modelos de los modelos de techo a escala piloto. De izquierda a derecha: Techo Verde compuesto de Duranta, Techo Verde compuesto de Verdolaga y Cubierta de Concreto Convencional.*



### 3.3 OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TECHO VERDE Y LA CUBIERTA DE CONCRETO CONVENCIONAL.

Se describen las consideraciones que se utilizaron para el funcionamiento y la operación del sistema de techo verde.

#### *3.3.1 Medición y recolección de parámetros de escorrentía.*

Las condiciones de precipitación al que fueron sometidos los sistemas estuvieron restringidas a la intensidad de los fenómenos de lluvias presentados a lo largo del periodo en el cual se tomaron las mediciones. El periodo de recolección de estos parámetros está comprendido entre el 21 de Octubre y 15 de Noviembre de 2015.

Las mediciones de los caudales de esorrentía se realizaron en dos puntos; En el primer punto localizado cerca de las tres estructuras de techos a escala piloto, se llevó a cabo la medición del caudal entrante a los sistemas (afluentes), determinados por la intensidad y duración de la lluvia, y en el segundo punto de medición localizado bajo cada techo se midió el caudal de la esorrentía superficial de los sistemas de techo verde y la esorrentía superficial del techo de concreto convencional.

Las mediciones en el primer punto, ubicado cerca de los techos a escala piloto se llevaron a cabo por medio de una estación meteorológica OREGON SCIENTIFIC WMR200A, y en el segundo punto, bajo cada uno de los modelos de techo verde mediante un sensor de lluvia inteligente RG3-M (Donacion de la firma INASSA), que cuenta con una resolución de 0.2 mm como lo muestra la Figura 14; Cada sensor de lluvia cuenta con un sistema de almacenamiento de datos capaz de suministrar los valores de nivel de agua a lo largo del tiempo de cada fenómeno de lluvia, con lo que se determinó la variación de nivel y caudal de esorrentía cada cinco minutos a lo largo de estos, y con ello el tiempo de retención de agua en cada techo.

En el segundo punto de medición, bajo la cubierta de concreto convencional para las mediciones se implementaron dos tanques de almacenamiento de agua, cada uno de 5 L de capacidad y un par de balanzas grameras, cada una con una resolución de 40 g y capacidad máxima de 5 Kg, para así determinar el volumen de agua de esorrentía mediante la masa de agua, y registrándolo cada cinco minutos por medio del monitoreo de estos con una cámara de vigilancia IP CAMERA MAXOVISION, esquema ilustrado en la Figura 15.

*Figura 14. Esquema general de equipos de los sistemas de techo verde y ambiente. A la izquierda los equipos de medición en el primer punto y a la derecha en el segundo punto.*



*Figura 15. Esquema general de equipos modelo de cubierta convencional*



### *3.3.2 Medición y recolección de datos de parámetros térmicos.*

Cada uno de los parámetros requeridos para la evaluación del efecto térmico producido por los sistemas de techo de manera individual estuvieron sujetos a las condiciones ambientales locales presentes durante el tiempo de recolección de los parámetros térmicos requeridos, es decir, entre el 21 de Octubre y 3 de Noviembre de 2015.

Los parámetros en el primer punto corresponden a los relacionados con el exterior, correspondientes a la temperatura ambiente, los cuales fueron medidos en intervalos de cinco minutos por medio de la estación meteorológica Oregon Scientific WMR200A, y en segundo punto, bajo cada uno de los pilotos de techo, aproximadamente 5 mm bajo la estructura del techo, los cuales fueron realizados en cada Techo Verde por medio del sensor de temperatura de cada sensor de lluvia inteligente RG3-M, con una resolución de 0.01 °C, y en la cubierta de concreto convencional por medio de un sensor de temperatura con una resolución de 0.1°C, como se ilustra en la Figura 16.

Figura 16. Esquema general de equipos del sistema de techo verde y cubierta convencional.  
a) Primer Punto (Interfaz de Estación Meteorológica) y sensores inteligentes de temperatura en b) Techo Verde compuesto de Duranta, c) Techo Verde compuesto de Verdolaga y d) Cubierta de Concreto Convencional.



### 3.4 REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE DATOS.

Las técnicas utilizadas para el registro y procesamiento de los datos obtenidos en cada intervalo de tiempo por medio de los sistemas de monitoreo y recolección de datos, fueron,

Precipitación, caudales de escorrentías salientes, el tiempo de retención, la intensidad y duración de lluvia, y temperatura en cada uno de los puntos de medición.

### 3.4.1 Análisis de la información primaria.

La información primaria obtenida de los parámetros de escorrentía está descrita en la Tabla 6, y corresponde a los datos del caudal y la altura de la precipitación y escorrentía del sistema. Con base en dicha información fueron realizados los respectivos hidrogramas de nivel y caudal de escorrentía, y analizada la retención, reducción de caudal pico y tiempo de retención en cada techo verde respecto al techo de referencia (Ver Tabla 8) con el fin de obtener su rendimiento hidrológico.

El esquema para la recolección de parámetros térmicos es descrito en la Tabla 7, que comprende la información de los datos de variación de temperatura interna y externa del techo estos fueron recopilados para cada techo y posteriormente condensados en la Tabla 9, así como en una serie de graficas que permiten la comparación de la temperatura ambiente y bajo cada techo en el tiempo.

*Tabla 6. Esquema para la recolección de la información primaria de los parámetros de escorrentía.*

RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN PRIMARIA DE PARÁMETROS DE ESCORRENTÍA			
Tiempo (min)	Precipitación	Escorrentía del Sistema	
		Superficial	
	Altura (mm)	Altura (mm)	Caudal (mm/min)

*Tabla 7. Esquema para la recolección de la información primaria de los parámetros térmicos*

RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN PRIMARIA DE PARÁMETROS TÉRMICOS				
Tiempo (min)	Temperatura (°C)			
	Ambiente	Bajo plantilla de concreto	Techo Verde de Duranta	Techo Verde de Verdolaga

Tabla 8. Esquema para la información de los parámetros de escorrentía

<b>ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN PRIMARIA DE PARÁMETROS DE ESCORRENTÍA</b>			
<b>Precipitación (mm)</b>	Disminución de Escorrentía (%)	Aumento del Tiempo de Retención (min)	Disminución del caudal pico (%)

Tabla 9. Esquema para la información de los parámetros térmicos

<b>ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN PRIMARIA DE PARÁMETROS TÉRMICOS</b>			
<b>Periodo</b>	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura bajo el Sistema	Reducción de la Temperatura bajo el Sistema (°C)
<b>Día</b>			
<b>Noche</b>			

### 3.5 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN SECUNDARIA Y COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

Esta última etapa de la metodología corresponde a la comparación de la información primaria con la secundaria, obtenida de diferentes investigaciones, provenientes de publicaciones fidedignas de revistas indexadas y medios virtuales recopilados en la revisión bibliográfica.

#### 3.5.1 Parámetros para la comparación y el análisis.

La comparación se realizó a las características y parámetros relacionados con la disminución de caudal de escorrentía y tiempo de retención, así como disminución de la temperatura interna entre la información primaria recolectada y los resultados de las investigaciones recopiladas en el estado del arte.

### 3.5.2 *Evaluación de los resultados*

Con la realización de cada uno de los pasos descritos en la metodología fue posible obtener las siguientes variables:

- Eficiencia de los techos verdes a escala piloto en la disminución de caudales de escorrentía y aumento de los tiempos de retención en comparación con las cubiertas de concreto convencionales, análisis que se realizara en base los resultados obtenidos mediante las ecuaciones 1,2 y 3.
- Eficiencia en la disminución de la temperatura debajo del sistema de techo verde en comparación con las cubiertas de concreto convencionales.
- Viabilidad para la aplicación de los techos verdes en la ciudad de Cartagena de Indias, teniendo en cuenta las condiciones climáticas y la vegetación nativa de la zona.
- Eficiencia del esquema general de techo verde suministrado por los manuales y guías en la construcción de techos verdes en la ciudad de Cartagena de Indias.
- Comparación de los resultados obtenidos en esta investigación con los resultados de otras investigaciones a nivel nacional e internacional relacionadas con la disminución de caudales de escorrentía, aumentó en el tiempo de retención y disminución de temperatura interna.

## 4 RESULTADOS

Con base en la revisión bibliográfica realizada, el desarrollo de los procedimientos experimentales y utilización de las herramientas descritas en la metodología en este capítulo son condensados los resultados y sus respectivos análisis.

### 4.1 SELECCIÓN DE LA VEGETACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TECHO VERDES

Gracias a las asesorías suministradas por el Biólogo Reynaldo Fajardo, se procedió a realizar un bioensayo de resistencia a largos periodos de sequía e intensa radiación solar a las plantas preseleccionadas, las cuales fueron: Duranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani forrajero y Veranera; las cuales cuentan con las características indicadas para integrar los sistemas de techo verde. El bioensayo se realizó por un periodo de 15 días con el fin de evaluar y comparar las variaciones físicas que presentaban las plantas a lo largo de los días bajo las mismas condiciones, esto con el fin de identificar y posteriormente seleccionar las plantas con mejores condiciones para integrar los sistemas de techo verde.

En la Figura 17 y Figura 18 se puede observar las condiciones iniciales de las plantas y cuál fue su cambio luego de 15 días de iniciado el ensayo, de forma análoga el monitoreo diario de las características físicas de las plantas está plasmado del Anexo 8 al Anexo 20. Cabe resaltar que para algunas plantas, como es el caso del Maní forrajero, el bioensayo no duró los 15 días previstos, ya que se marchitó de manera acelerada y a los pocos días murió.

De acuerdo con la Figura 18, las plantas con mejores condiciones de resistencia a largos periodos de sequía son: Duranta, Veranera y Verdolaga. Para este proyecto se escogieron como plantas nativas la Duranta y la Verdolaga, descartando así la Veranera, ya que aunque tiene buena resistencia a largos periodos de sequía y en su etapa de vida temprana cumple con las condiciones de ser un arbusto pequeño, sin el cuidado de estar podándola puede alcanzar un tamaño mayor a lo recomendado para los sistemas de techo verde extensivos.

*Figura 17. Condiciones iniciales ( DÍA 1) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera*



*Figura 18. Condiciones finales ( DÍA 15) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera*



Del monitoreo de las condiciones de la vegetación luego de su puesta en obra en cada una de las plantas piloto fue evidente que a pesar de que la Duranta y Verdolaga la vegetación puede resistir a periodos de sequía cercanos a 15 días hasta alcanzar su marchitez, al llegar a este punto, difícilmente la planta puede recuperar sus condiciones, por lo que con periodos prolongados de 5 o 7 días de sequía y poco riego sucesivos aproximadamente difícilmente se garantizará la vitalidad de estas plantas. Por tanto, para garantizar la vitalidad del techo verde es indispensable un sistema de irrigación para el sistema en un periodo aproximado de 3 días, variable dependiendo de la capacidad de drenaje del sustrato y la radiación solar a la que este expuesta.

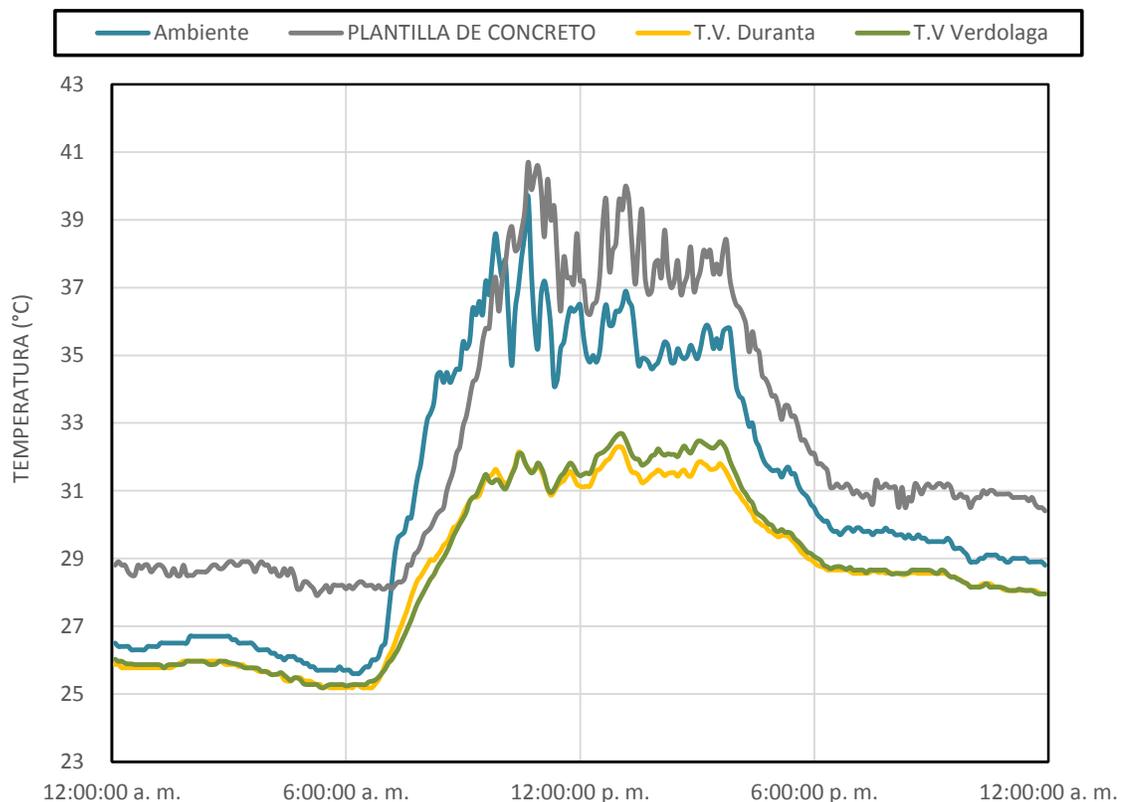
#### 4.2 EFECTO TÉRMICO DE LOS SISTEMAS DE TECHO VERDE

De la operación de cada uno de las plantas piloto de Techo Verde y Cubierta de Concreto Convencional fueron recolectados 3 032 datos para cada punto de medición, que corresponden a la temperatura en el horario diurno y nocturno entre el 21 de Octubre y 3 de Noviembre en intervalos de 5 min, por lo que como resultado de su recolección y procesamiento se caracterizan las temperaturas presentes en cada uno de los sistemas a escala piloto, así como la mitigación de la temperatura respecto al ambiente y la cubierta de concreto convencional.

En un día típico, como es el caso del 27 de Octubre de 2015, durante el horario diurno (6:00 a.m. – 6:00 p.m.) la temperatura ambiente es de 33.7 y 27.9 °C en promedio durante el horario diurno y nocturno respectivamente, con un mínimo de 25.6 °C a las 06:10 a.m., hora a partir de la cual empieza a incrementar hasta 39.7 °C a las 10:35a.m. y se mantiene oscilando entre 35 y 36°C hasta las 3:35 p.m., hora en la que empieza a descender hasta las 12:00 a.m., así mismo, en la cubierta de concreto el promedio es de 34.92 °C y un mínimo de 28.1 °C a las 06:10a.m., luego de esta hora asciende a 40.7 °C a las 10:35 a.m. y se mantiene oscilando entre 40.0 y 38.4 °C, luego del cual presenta poca variación, de entre 31.8 y 30.6 °C hasta las 12:00a.m. En cuanto a los Techos Verdes, el compuesto de Duranta exhibe una temperatura promedio de 30.3 y 27.0 °C durante el horario diurno y nocturno respectivamente, con una

temperatura mínima de 25.2 °C a las 5:20 a.m., la cual asciende hasta 31.8 °C a las 10:30 a.m. y se mantiene con una pequeña variación de hasta 31.7 °C a las 3:35 p.m., tiempo después del cual disminuye hasta 25.3 °C alrededor de las 6:00 p.m., y el compuesto de Duranta presenta un patrón muy similar, alcanzando un mínimo de 25.2°C a las 5:20 a.m., tiempo desde del cual se eleva hasta alcanzar el máximo de 31.8°C a las 10:30 a.m., y variando levemente hasta las 3:45 p.m., luego del cual se mantiene relativamente estable. (Figura 19)

*Figura 19. Temperatura ambiente y bajo cada uno de los sistemas de techo a lo largo del 27 de Octubre de 2015.*



Del análisis realizado entre las fechas especificadas se evidenció que el patrón de la temperatura durante un día es variable. Sin embargo, típicamente al inicio del periodo diurno, es decir, 6:00 a.m., alrededor del cual se presenta el mínimo, la temperatura empieza a ascender de manera elevada hasta alcanzar el valor máximo del día, entre 10:30 y 11:30 a.m., inclusive entre 12:00 m. y 1:00 p.m.; Después de este, la temperatura se mantiene

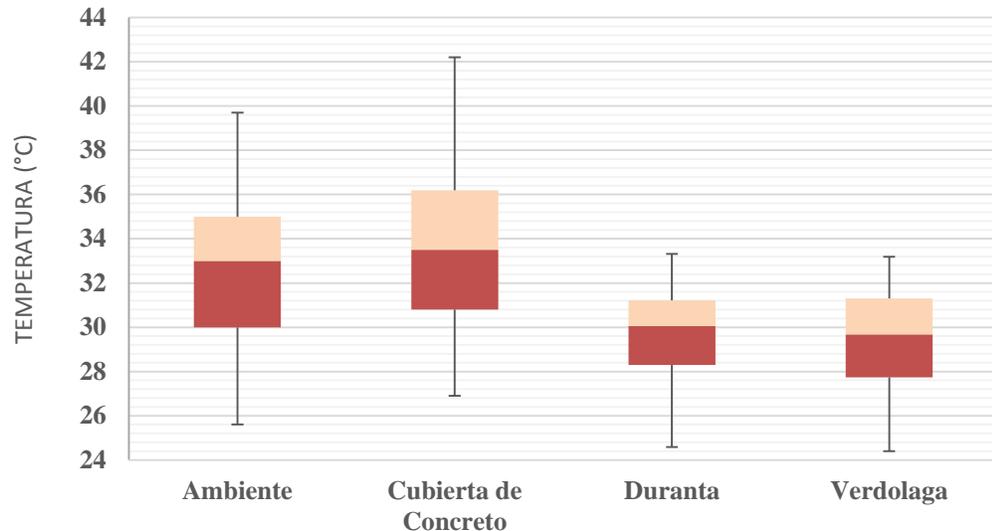
aproximadamente constante hasta el intervalo entre 2:30 y 3:30 p.m., después del cual se exhibe un descenso pronunciado, que finaliza aproximadamente entre 5:00 y 5:30 p.m. Durante el periodo nocturno la variación es mucho menor, ya que exhibe un comportamiento muy cercano a la uniformidad a lo largo de este, ya que, desde su inicio, a las 6:00 p.m. desciende muy levemente hasta las 12:00 a.m., caso similar al periodo siguiente.

A pesar de que la variación de la temperatura en cada uno de los puntos es ligeramente similar en la medida que los valores máximos y mínimos, e inicio de la variación significativa de temperatura ocurre en el mismo instante, dicha variación en los Techos Verdes presentan una variación menor de la temperatura al resto, ya que mientras en un día típico (Figura 20) en el periodo de mayor variación, es decir, entre 6:00 y 10:30 a.m. su temperatura puede pasar de 25.2 a 31.9 °C, el ambiente puede variar de 25.6 a 39.7 °C y bajo la Cubierta de Concreto de 28.1 a 40.7 °C. Esto a la vez es evidente durante la totalidad del tiempo de análisis, ya que la variación entre los valores máximos y mínimos durante los periodos diurno y nocturno (Figura 21 y Figura 22) es menor bajo los Techos Verdes compuestos de Duranta (24.6 a 33.3 °C) y Verdolaga (24.4 a 33.2 °C) que en el ambiente (25.6 a 39.7 °C) y Cubierta de Concreto (26.9 a 42.2 °C).

Un factor fundamental para determinar la eficiencia térmica de los Techos Verdes es la mitigación de la temperatura, además para este estudio se constituye como el factor más representativo del análisis de los parámetros térmicos; De acuerdo con este análisis (Figura 21 y Figura 22), la temperatura promedio bajo cada uno de los Techos Verdes compuestos de Duranta durante el horario diurno y nocturno es 29.63 y 27.19 °C y de Verdolaga de 29.45 y 27.16 °C respectivamente, mientras que la del ambiente es 32.5 y 28.0 °C y bajo la Cubierta de Concreto de 33.6 y 29.4 °C. Así mismo, la variación de la temperatura bajo el Techo Verde compuesto de Duranta durante el día (24 h) con respecto al ambiente es 1.69 °C y respecto a la parte baja de la Cubierta de Concreto de 3.20 °C, y durante los horarios diurno y nocturno respecto al ambiente de 2.61 y 0.72 °C y la Cubierta de Concreto de 3.85 y 2.54 °C respectivamente, y bajo el Techo Verde compuesto de Verdolaga durante el día respecto al

ambiente y la Cubierta de Concreto de 1.64 y 3.14 °C respectivamente, de manera análoga, durante los horarios diurno y nocturno respecto al ambiente de 2.61 y 0.67 °C y a la Cubierta de Concreto de 3.77 y 2.51 °C.

*Figura 20. Temperatura en cada uno de los puntos de medición durante el horario diurno.*



La diferencia de temperatura entre los Techos Verdes y la Cubierta de Concreto Convencional encontrada en este estudio está dentro del rango de valores de las investigaciones consultadas, que varían entre 1.7 y 5.2 °C (Jim & Peng, Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof, 2012) (Tabla 2). Sin embargo, en ninguno de los estudios encontrados se hace la comparación entre la disminución de la temperatura durante los horarios diurno y nocturno respectivamente.

La disminución de la temperatura debajo del techo tiene lugar por el efecto de las plantas y el sustrato (Zhao, Tabares, Srebric, & Komarneni, 2014), gracias a que las plantas desarrollan los procesos de evaporación del agua y cobertura de la radiación, y el suelo o sustrato, en menor influencia, actúa como un aislante térmico, gracias a su elevada masa térmica, que le permite controlar el aumento de la temperatura (Xiao, Lin, Han, & Zhang, 2014), así como su conductividad térmica y capacidad de calor específica (Zhao, Tabares, Srebric, &

Komarneni, 2014). De igual manera, no existe diferencia apreciable en la disminución de temperatura al usar Verdolaga o Duranta como capa vegetal, muy probablemente debido a su similitud en la cobertura de hojas.

Figura 21. Temperatura en cada uno de los puntos de medición durante el horario nocturno.

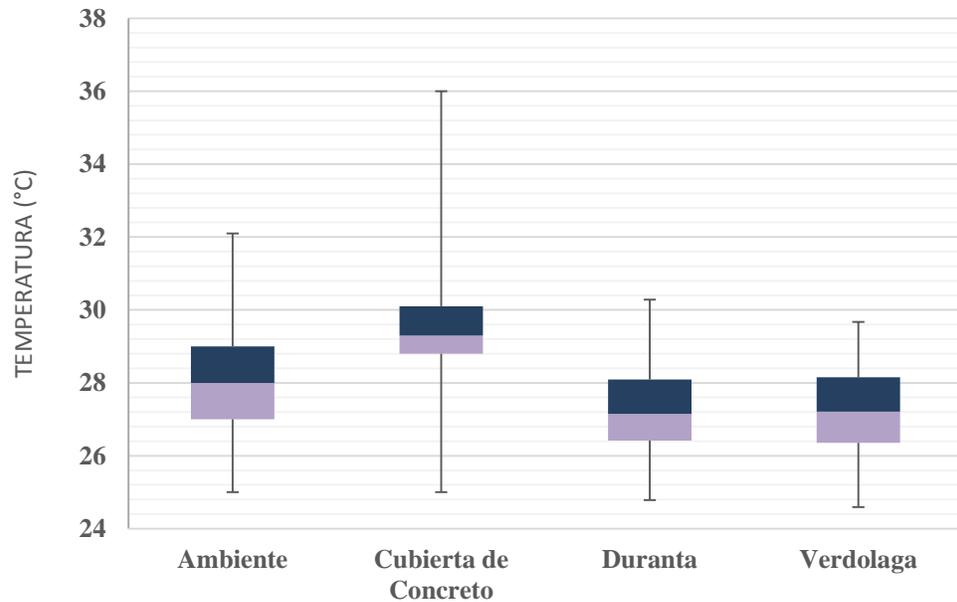


Tabla 10. Disminución de temperatura de techos verdes con respecto a la temperatura ambiente y cubierta de concreto

Período	Parámetro Estadístico	Respecto al Ambiente (°C)		Respecto a la Plantilla de Concreto (°C)	
		T.V. Duranta	T.V. Verdolaga	T.V. Duranta	T.V. Verdolaga
Diurno	Promedio	2.66	2.61	3.85	3.77
	Promedio ± Desviación Típica	2.66 ± 1.73	2.61 ± 1.64	3.85 ± 1.53	3.77 ± 1.32
Nocturno	Promedio	0.72	0.67	2.54	2.51
	Promedio ± Desviación Típica	0.72 ± 0.63	0.67 ± 0.58	2.54 ± 0.45	2.51 ± 0.44
Total	Promedio	1.69	1.64	3.20	3.14

La disminución de la temperatura bajo los Techos Verdes es en la mayor parte proporcionada por cada uno de estos debido a que el sitio de medición corresponde al punto justo debajo del Techo, en el cual la transferencia de calor a través de las paredes de la planta piloto no es significativa, en gran medida por ser de madera, cuyo coeficiente de conductividad térmica es relativamente bajo, 0.094 W/mK aproximadamente. Sin embargo, para el desarrollo de un análisis de la disminución de la temperatura al interior de una vivienda debe ser tenido en cuenta la transferencia de calor a través del techo y la fachada, constituyéndose esta última a su vez como una variable de interés.

La disminución de la temperatura al interior de los sistemas de techo verde en la ciudad de Cartagena en este proyecto es una muestra de un resultado positivo; para hacer esta afirmación se debe comparar un proyecto de investigación el cual cuente con condiciones similares a las que estuvieron expuestos los sistemas de techo verde en este proyecto; Para esta comparación se encontró en la revisión bibliográfica el estudio realizado en Hong Kong por el investigador C.Y. Jim, en el que las condiciones climáticas son similares ya que fue realizado bajo un clima tropical-húmedo y la vegetación utilizada fue una especie de arbusto conocida como *Duranta repens*, la cual es del mismo género de la *Duranta Golden*, utilizada en este proyecto.

De acuerdo con el proyecto llevado a cabo en la ciudad de Hong Kong por C.Y. Jim, la disminución de la temperatura con respecto a la del aire empleando *Duranta repens* fue de 0.8°C, la cual difiere del obtenido en este estudio que fue de 1.7°C debido probablemente a que la composición del resto de capas del sistema empleadas en dicho estudio fueron diferentes (Por ejemplo, una capa de suelo y un panel para el almacenamiento de agua de 0.05 m cada uno), comprobando así que la composición del sistema, además de la vegetación puede llegar a variar notablemente la capacidad de disminución de la temperatura.

Al realizar una comparación con un estudio realizado a nivel nacional, más exactamente en Honda, Tolima, el cual presenta un Clima Cálido Seco tropical, elaborada por el

investigador Mateo de Rhode con el fin de determinar la disminución de la temperatura al interior de una vivienda utilizando techos verdes, y con resultados de variación de  $0.94^{\circ}\text{C}$  con respecto a la temperatura ambiente y  $0.56^{\circ}\text{C}$  con respecto al techo convencional de concreto (de Rhodes Valbuena, 2012), se puede decir que los resultados obtenidos en la presente investigación para la disminución de la temperatura al interior de una vivienda con respecto a la temperatura ambiente es mayor ( $1.69^{\circ}\text{C}$ ), así como la disminución bajo un techo convencional de concreto ( $3.20^{\circ}\text{C}$ ), esto puede deberse a la diferencia del sistema de techo con respecto al del presente proyecto, el cual consiste en unas canaletas de guadua, las cuales ofrecen menor cobertura que un Techo Verde que cubra la totalidad de la estructura de la cubierta.

A pesar de que la disminución de la temperatura proporcionada por los sistemas de Techo Verde varía con su composición, clima y demás factores, de acuerdo con los hallazgos de este proyecto, se puede afirmar que mediante la utilización de este sistema en Cartagena de Indias, la cual es una zona con un clima tropical semiárido, un Techo Verde como el implementado en el estudio permite la disminución de la temperatura bajo el techo y contribuye a su disminución al interior de una vivienda (Tabla 10).

#### 4.3 EFECTO DE LOS TECHOS VERDES EN LA DISMINUCIÓN DE ESCORRENTÍA GENERADOS POR PRECIPITACIONES.

La recopilación de información concerniente a los parámetros hidráulicos en los sistemas de techo verde y cubierta de concreto convencional fue llevada a cabo durante Octubre y Noviembre de 2015 en la ciudad de Cartagena de Indias, tiempo en el que fueron analizados en cinco eventos de lluvia. Los parámetros recolectados corresponden a intensidad de precipitación y caudal de salida o escorrentía, así como tiempo y volumen de retención de cada uno de los techos, además fueron tomados para cada lluvia en intervalos de un minuto, con el fin de obtener su distribución en cada techo a lo largo de cada evento de lluvia.

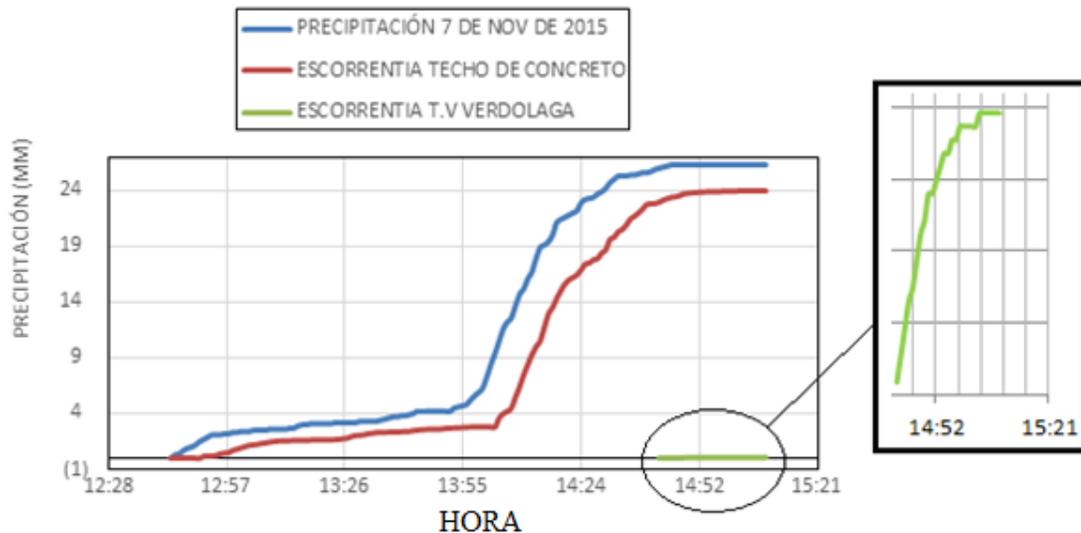
La fecha, precipitación, duración e intensidad de la totalidad de los eventos de lluvia analizados están listados en la Tabla 11, de esta se puede obtener la precipitación total obtenida de estos eventos, equivalente a 33.4 mm. Cabe resaltar que el evento de lluvia de mayor precipitación corresponde a 26.3 mm, el cual es un evento con intensidad promedio en la ciudad de Cartagena (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. CIOH, 2010), sin embargo, el resto de eventos presentan una precipitación e intensidad muy baja, debido a que el periodo en el que estas fueron recolectadas correspondió a un año influenciado por el Fenómeno del Niño, el cual entre otros afecta la región caribe colombiana.

*Tabla 11. Inventario de precipitaciones analizadas para el estudio.*

<b>Fecha</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>Duración (h)</b>	<b>Intensidad (mm/h)</b>
30/Octubre/2015	3.1	0.3	10.3
03/Noviembre/2015	1.1	0.9	1.2
07/Noviembre/2015	26.3	2.3	11.4
12/Noviembre/2015	1.2	0.3	4.0
16/Noviembre/2015	1.1	2.7	0.4

De manera ilustrativa, el día 7 de Noviembre de 2015 durante el horario diurno (12:40 m – 3:09 pm) se presentó una lluvia representativa en el análisis por ser aquella con mayor duración e intensidad. La precipitación total fue de 26.3 mm de agua, con una duración de 2 horas y 29 minutos e intensidad de 11.4 mm/h. La precipitación acumulada a lo largo del tiempo de este evento está ilustrado en la figura 23, junto con las curvas representativas a la escorrentía generada por la cubierta de concreto y el techo verde integrado por la verdolaga; De esta representación es evidente que mientras que gran parte de la precipitación es transmitida por la Cubierta de Concreto, más específicamente 24 mm, el Techo Verde compuesto de Verdolaga solo transmitió o escurrió 0.08 mm. Además, el techo verde integrado por Duranta no presento escorrentía, muy probablemente debido a que se apreció que este presenta mayor cobertura vegetal y por ende mayor intercepción de agua que la Verdolaga.

Figura 22. Resultados de precipitación y escorrentía presentados el día 7 de Noviembre de 2015



Para los demás eventos de lluvias representados en los anexos 17, 18,19 y 20, los Techos Verdes a escala piloto integrados por la Duranta y la Verdolaga no presentaron ningún tipo de escorrentía, debido tanto a la poca precipitación recibida por los sistemas, como a las condiciones de sequía antecedente a cada evento de precipitación, ya que en promedio hubo cuatro días de sequía entre una precipitación y otra, proceso que contribuyó a que el sustrato de los sistemas de techo verde perdieran gran parte de su humedad y recuperara su capacidad de absorción de agua, por lo que al presentarse el siguiente evento de lluvia, toda la precipitación era absorbida por el sustrato y no era generada la escorrentía esperada.

#### 4.3.1 Rendimiento en retención de aguas pluviales.

Este rendimiento se representa en la retención de agua lluvia y con ello a la disminución de escorrentía superficial del techo. Para calcular este rendimiento se utilizó el rendimiento de retención absoluto (RPI) con base en la Ecuación 1. En la Tabla 12 se tabulan los resultados de cada escorrentía generada y además el indicador RPI para cada techo verde y cubierta de concreto.

Tabla 12. Escorrentias generadas y indice %RPI para cada techo.

Fecha	TECHO VERDE CON DURANTA		TECHO VERDE CON VERDOLAGA		TECHO DE CONCRETO	
	ESCORRENTIA GENERADA EN (MM)	RPI %	ESCORRENTIA GENERADA EN (MM)	RPI %	ESCORRENTIA GENERADA EN (MM)	%RPI
30/Octubre/2015	0.0	100	0.0	100	2.3	25.806
03/Noviembre/2015	0.0	100	0.0	100	0.2	81.818
07/Noviembre/2015	0.0	100	0.007833	99.70	23.96	8.8973
12/Noviembre/2015	0.0	100	0.0	100	0.8	42.857
16/Noviembre/2015	0.0	100	0.0	100	0.5	61.538

Como se muestra en la tabla 18, las retenciones presentadas para los eventos de lluvias en los techos verdes fue de 100% en la mayoría de los casos, de estos resultados se puede decir que para el diseño de Techo Verde utilizado en esta investigación y las condiciones de sequía presentes en la zona se puede obtener una retención aproximada de 100% para eventos de lluvia con precipitación menor a 20 mm. De acuerdo con la literatura consultada, el rendimiento de los sistemas de Techo Verde varían con respecto a la intensidad de la lluvia (Nawaz, McDonald, & Postoyko, 2015) por lo que para precipitaciones menores a 20 mm esta es de 85% (Raha Hakimdavara, 2014) o 45% en promedio (Spengen, 2010).

Durante el periodo de estudio influenciaron en la obtención de resultados no significativos para poder determinar la capacidad de retención de los Techos Verdes, ya que la escorrentía afluente de estos no fue lo suficientemente intensa como para que se produjeran niveles de escorrentía efluente significativos.

#### 4.3.2 Disminución de caudal pico de escorrentía

Está representado por la disminución del caudal pico de la escorrentía efluente del sistema y se determina mediante la Ecuación 3. Sin embargo, a pesar de que se obtuvo escorrentía de la Cubierta de Concreto no fue posible realizar una comparación debido a que la escorrentía

efluente de los Techos Verdes fue aproximadamente nula y no fue posible determinar la disminución del caudal pico en los Techos Verdes.

#### *4.3.3 Aumento de tiempo de retención de aguas pluviales*

Está representado por el aumento en el tiempo de retención o estanqueidad del agua, y se determina mediante la Ecuación 5. Para el presente estudio no pudo ser determinada debido a que al ser la esorrentía efluente de los Techos Verdes aproximadamente nula, no fue posible determinar la diferencia de tiempo entre el inicio de la lluvia y de la esorrentía generada por el sistema.

## 5 CONCLUSIONES

Se evaluó la viabilidad de la construcción y operación de los sistemas de Techo Verde en la ciudad de Cartagena de Indias teniendo en cuenta como factor esencial la existencia de vegetación nativa apta para cumplir con las condiciones de funcionalidad y estética de un techo verde; Como resultado de esta evaluación se obtuvo una preselección de diferentes plantas, de las cuales dos fueron escogidas por poseer las características más adecuadas para su integración a los sistemas de Techo Verdes, correspondientes a Duranta y Verdolaga. Su escogencia se dio con base en un bioensayo, que consistió en la evaluación de su resistencia a la sequía, del cual se concluyó que entre los tipos de vegetación identificados, este par presentan una resistencia a la sequía relativamente alta en comparación con la vegetación de la zona, así como los requerimientos de estética, funcionalidad y tamaño más aptos de acuerdo a los contemplados en las guías y manuales existentes a nivel nacional e internacional.

Con base en la evaluación del efecto térmico de las plantas piloto de Techo Verde compuestas de Duranta y Verdolaga, construidas en la Universidad de Cartagena, fue posible determinar que bajo las condiciones ambientales de la ciudad de Cartagena de Indias este SUDS se constituye como una opción eficiente para ser usado como un aislante térmico.

La eficiencia del uso de Techos Verdes como aislante térmico de acuerdo con los análisis realizados radica en que la transferencia de calor a través del sistema es menor que en las cubiertas de concreto convencional, ya que fue determinado que en un día promedio la temperatura transferida al interior de una vivienda es 3.20 °C menor en el Techo Verde conformado por Duranta y 3.14 °C en el conformado por Verdolaga, así mismo, e incluso 1.69 °C y 1.64°C menor a la temperatura del aire al exterior de estos en los Techos Verdes compuestos de Duranta y Verdolaga respectivamente.

La disminución de la temperatura es en su mayoría atribuible al Techo Verde debido al punto de medición de la temperatura interna escogido, es decir, bajo el techo, y al material de las paredes, correspondiente a madera, la cual es un buen aislante térmico. Sin embargo, en el análisis de una vivienda debe ser tenido en cuenta la transferencia de calor tanto a través del techo como la fachada, es decir, la cobertura total del edificio.

La eficiencia de los Techos Verdes a escala piloto en la disminución de Volumen y Caudal de escorrentía y tiempo de retención no pudo ser determinada debido a que las condiciones ambientales presentadas en la zona durante el periodo de obtención de datos, principalmente la sequía y escasa precipitación influenciada por el Fenómeno del Niño no dio lugar a la existencia de escorrentía efluente del sistema. Sin embargo, a pesar de dicho fenómeno, fue posible determinar que los Techos Verdes a escala piloto tuvieron mayor disminución de los volúmenes de escorrentía en comparación con la cubierta de concreto convencionales, ya que mientras el último produjo escorrentía superficial bajo los mismos eventos de lluvia, los Techos Verdes no produjeron ninguna escorrentía, a pesar de que no fue posible determinar el valor cuantitativo de la disminución de escorrentía por no haber obtenido la capacidad máxima de retención de estos SUDS.

Como producto final se entregaron tres plantas piloto, dos de Techo Verde y una Cubierta de Concreto, que contribuyen a complementar el inventario de sistemas urbanos de drenaje sostenible a escala de laboratorio presente en la facultad de Ingeniería de la Universidad de Cartagena. Además, es una contribución al desarrollo de la capacidad e interés necesario para desarrollar futuros estudios relacionados con el tema en Cartagena de Indias.

Los hallazgos de estudio constituyen un aporte al desarrollo sostenible de Cartagena de Indias, pudiendo ser extendido a zonas con condiciones similares, gracias a que evalúa la viabilidad de los de Techos Verdes como un SUDS capaz de contribuir a la mejora de las condiciones de drenaje y disminución del consumo energético por el uso equipos de refrigeración.

## 6 LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo del proyecto fueron encontradas limitaciones en la obtención de los objetivos propuestos:

- **Identificar las especies nativas aptas para integrar un Techo Verde:** La selección de la vegetación estuvo limitada debido a que en Cartagena de Indias aún no existe un catálogo o manual enfocado en la descripción de vegetación que pueda ser implementada en un Techo Verde, así mismo, al momento de realizar este tipo de investigación, la información consultada acerca de los tipos de vegetación nativa no contaba con la suficiente información referente a las características exigidas por este tipo de SUDS.
- **Determinación del efecto térmico:** Debido a la escasez de recursos para la adquisición de equipos aptos para determinar las variables térmicas del sistema, no fue posible incorporar un mayor número de variables en el estudio del efecto térmico, limitando la evaluación de la transferencia del calor y energía a través del sistema.
- **Determinación de la eficiencia hidráulica:** Por la presencia de condiciones climatológicas desfavorables para las variables en estudio, influenciadas por el Fenómeno del Niño, representadas por la escasez de precipitación y los largos periodos de sequía, no fue posible determinar la totalidad de parámetros hidráulicos requeridos para la determinación de la eficiencia del sistema en comparación con las cubiertas de concreto convencional. De igual manera, no fue posible realizar una simulación de lluvias con el fin de poder determinar a pesar de dicha adversidad el objetivo planteado, debido a que no se contó con los recursos necesarios.

Las recomendaciones planteadas con base en este estudio para investigaciones posteriores relacionadas con esta temática son:

- **Realizar un catálogo extenso de la vegetación nativa de Cartagena de Indias apta para integrar un Techo Verde:** Desarrollar una(s) investigaciones exhaustivas en aras de conocer con mayor detalle aquellos tipos de vegetación que cumplan con las condiciones de funcionalidad y estética requeridas, de modo que se incremente su viabilidad en la ciudad.
- **Realizar estudios de construcción de Techos Verdes con distintos tipos de plantas:** Al igual que investigar las características de la vegetación es necesario que se evalúe su implementación al sistema, de forma que puedan ser evaluados la posibilidad de combinación de cultivos con el fin de evaluar su eficiencia, y de igual forma determinar su influencia en el comportamiento térmico e hidráulico.
- **Evaluar la eficiencia hidráulica de Techos Verdes bajo la influencia de lluvias simuladas:** Con el fin de evitar limitaciones en la determinación de los parámetros hidráulicos necesarios para la determinación de la eficiencia en la disminución de escorrentía y tener mayor control de estas, es recomendable realizar los monitoreos de estos parámetros sometiendo a los sistemas de Techo Verdes a lluvias simuladas, para lo cual se sugiere que se use un sistema de Simulador de lluvias integrado por aspersores.
- **Realizar un balance energético de Techos Verdes:** Realizar un estudio en el que se evalúe con gran exactitud la transmisión de energía y calor a través de las capas del sistema, y así poder conocer con mayor detalle las variables que intervienen en su efecto térmico.

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.Niachou, K. P. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 719-729.
- Alexandri, E. (2001). *The Effect of Green Roofs on the Urban Climate Case of study: Athens*. Tesis Magistral, Universidad de Cambridge, Departamento de arquitectura.
- Alpha Coders. (15 de Marzo de 2015). *wall.alphacoders.com*. Obtenido de [http://wall.alphacoders.com/by\\_sub\\_category.php?id=218763](http://wall.alphacoders.com/by_sub_category.php?id=218763)
- Ambiente, S. D. (2011). *SISTEMA URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE*. Bogotá D. C: SISTEMA URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE.
- Arkiblog. (08 de 2014). *Arkiblog*. Obtenido de <http://arkiblog.tumblr.com/post/93912043127/5-joyas-arquitectonicas-con-green-roofs-en>
- arquitecturayempresa. (31 de Agosto de 2014). Obtenido de <http://www.arquitecturayempresa.es/noticia/techos-verdes>
- C.Y, J. (2012). Effect of vegetation biomass structure on thermal performance of tropical green roof. *Landscape and Ecologiccal Engineering*, 173-187.
- Carroll, N. (2010). *The Thermal and Rainwater Runoff Performance of an Extensive Green Roof System*. Glasgow: Universidad de Strathclyde.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. CIOH. (2010). *Climatología de los Principales Puertos del Caribe Colombiano*. Cartagena De Indias, D.T. y C.
- CIRIA. (2007). *The SuDS manual*. Londres: CIRIA.
- de Rhodes Valbuena, M. (2012). *IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE TECHO VERDE Y SU BENEFICIO TERMICO EN UN HOGAR DE HONDA, TOLIMA (COLOMBIA)*. Bogotá D.C: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.
- Departamento de Valorización Distrital. (2010). Plan Maestro de Drenajes Pluviales., (pág. 61). Cartagena de Indias D. T. y C.
- EcoHabitar. (2014). los techos verdes son obligatorios ahora en Copenhague. *ECOHABITAR*.
- EL UNIVERSAL. (13 de Agosto de 2013). Cartagena avanza hacia la sostenibilidad. *EL UNIVERSAL*.
- Evolve environment arquitectura. (15 de Marzo de 2015). *Evolveea*. Obtenido de Evolveea: <http://www.evolveea.com/work/phipps-center-for-sustainable-landscapes-living-building-challenge>
- Fajardo, R. (20 de Abril de 2015). Estudio de la Vegetación Nativa de Cartagena de Indias aplicable a Techos Verdes. (D. J. GONZALEZ MARTINEZ, & J. J. DE POMBO ANGULO , Entrevistadores)
- Fassman-Beck, E., Voydel, E., Simcock, R., & Hong, Y. (2013). 4 living roofs in 3 locations: Does configuration affect runoff mitigation? *Journal of Hydrology*(490), 11-20.

- Getter, K. L., Rowe, D. B., & Andresen, J. A. (2007). Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 225-231.
- Greenroofs.com. (03 de Marzo de 2015). *www.greenroofs.com*. Obtenido de <http://www.greenroofs.com/projects/plist.php>
- Gregorie, B., & Clausen, J. (2011). Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering*(73), 963-969.
- Gwendolyn, K., & Wong, C. J. (2014). Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime. *Ecological Engineering*(70), 366-378.
- Hakimdavar, R., Culligan, P., Finazzi, M., Barontini, S., & Ranzi, R. (2014). Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. *Ecological Engineering*(73), 494-508.
- Harper, G., Limmer, M., Showalter, W. E., & Burken, J. G. (2014). Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experimental green roof in Missouri, USA. *Ecological Engineering*.
- Hathaway, A. M., Hunt, W., & Jennings, G. D. (2008). A field study of green roof hydrologic and water quality performance. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 37-44.
- INVEMAR-Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias- CDKN. (2012). *LINEAMIENTOS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO PARA CARTAGENA DE INDIAS*. Cartagena de Indias D.T. y C.
- Jim, C. (2012). Effect of vegetation biomass structure on thermal performance of a green roof. *Landscape and Ecological Engineering*, 8, 173-187.
- Jim, C., & Peng, L. L. (2012). Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof. *Urban Forestry & Urban Greening*, 73-85.
- Ju Young Lee, M. J. (2015). A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs. *Journal of Environmental Management*, 171-176.
- Locatelli, L., Ole, M., Steen Mikkelsen, P., Arnbjerg-Nielsen, K., Bergen Jensen, M., & Binning, P. (2014). Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications. *Journal of Hydrology*(519), 3237-3248.
- MOMPARLER, S. P. (2007). *LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE: UNA ALTERNATIVA A LA GESTIÓN DEL AGUA DE LLUVIA*. Valencia, España.
- Moran, A., Hunt, B., & Jennings, G. (2003). *A North Carolina Field Study to Evaluate GreenRoof Runoff Quantity, Runoff Quality, and Plant Growth*. Department of Biological and Agricultural Engineering.
- Nawaz, R., McDonald, A., & Postoyko, S. (2015). Hydrological Performance of a Full-Scale Extensive Green Roof Located In a Temperate Climate. *Ecological Engineering*, 66-80.
- Nyuk Hien Wonga, Y. C. (2003). Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment*, 261-270.
- Palomo del Barrio, E. (1997). Analysis of the green roof cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*(27), 179-193.

- Raha Hakimdavara, P. J. (2014). Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. *Ecologica Engineering*, 494-508.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2011). *Guía de Techos Verdes en Bogotá*. Bogotá D.C: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2014). *Techos Verdes y Jardines Verticales. Una piel natural para Bogotá*. Bogotá D. C: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Simmons, M., Gardiner, B., Windhager, S., & Tinsley, J. (2008). Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems*, 11(4), 339-348.
- Spengen, J. v. (2010). *The effects of large-scale green roof implementation of the rainfall-runoff in a tropical urbanized subcatchment*. Singapur: Delt University of Thecnology.
- Tumini, I. (2010). Estrategias para la reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrir. *Sustainable building Conference*, (págs. 1-15). Madrid.
- Uhl, M. S. (2008). Green Roof Storm Water Retention –Monitoring Results. *International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland*.
- Van Spengen, J. (2010). *The effects of large-scale green roof implementation of the rainfall-runoff in a tropical urbanized subcatchment*. Singapur: Delt University of Thecnology.
- VanWoert ND, R. D. (2005). Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environmental Quality*, 1036-1044.
- Voyde, E., Fassman , E., & Simcock, R. (2010). Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 394, 384-395.
- Woods Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007). *The SuDS manual*. Londres: CIRIA.
- Xiao , M., Lin, Y., Han, J., & Zhang, G. (2014). A review of green roof research and development in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 633-648.
- Zhao, M., Tabares, P. C., Srebric, J., & Komarneni, S. (2014). Effect of plant and substrate selection on thermal performance of green roofs during the summer. *Building and Environment*, 78, 199-211.
- Zielinski, S., Garcia Collante, M. A., & Vega Paternina, J. C. (2012). *Techos verdes: ¿Una herramienta viable para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa Marta?*

## ANEXOS

### *Anexo 1. Manuales de Diseño Utilizados para la Investigación*

<b>Manuales de Diseño</b>			
<b>Nombre del Documento</b>	<b>Autor(es)</b>	<b>Año</b>	<b>Tema central del documento o artículo</b>
<b>The SuDS Manual</b>	CIRIA	2007	Guía de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible
<b>Guía de Techos Verdes en Bogotá</b>	Secretaría Distrital de Ambiente	2011	Establecer los requerimientos mínimos y recomendaciones para la correcta aplicación de Techos Verdes
<b>Techos Verdes y Jardines Verticales</b>	Secretaría Distrital de Ambiente	2014	Actualización de la Guía Técnica de Tecos Verdes de 2011 y añadir los requerimientos de Jardines Verticales
<b>Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof sites</b>	FLL	2002	Establecer los principios y requerimientos básicos para la planeación, ejecución y mantenimiento de Techos y Muros Verdes

### *Anexo 2. Información general de los artículos encontrados en las bases de datos de la Universidad de Cartagena con información relevante para esta investigación*

<b>BASE DE DATOS</b>				
<b>No</b>	<b>Título del Documento</b>	<b>Autor o Autores</b>	<b>Revista</b>	<b>Año</b>
1	A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs	Lee, Ju Y. Lee, Min J. Han, Mooyoung	Environmental Management	2015
2	Hydrological performance of a full-scale extensive green roof located in a temperate climate	Nawaz, Rizwan McDonald, Angus Postoyko, Sophia	Ecological Engineering	2014
3	Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an	Harper, Grace E. Limmer, Matt A.	Ecological Engineering	2014

	experiential green roof in Missouri, USA	Showalter, W. Eric Burken, Joel G.		
4	Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention	Getter, Kristin L. Rowe, D. Bradley Andresen, Jeffrey A.	Ecological Engineering	2007
5	Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime	Gwendolyn, K.L. Wong, C.Y. Jim	Ecological Engineering	2014
6	Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance	Hakimdavar, Raha Culligan, Patricia J. Finazzi, Marco Barontini, Stefano Ranzi, Roberto	Ecological Engineering	2014
7	Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality	Gregoire, Bruce G. Clausen, John C.	Ecological Engineering	2011
8	4 Living roofs in 3 locations: Does configuration affect runoff mitigation?	Fassman-Beck, Elizabeth Voyde, Emily Simcock, Robyn Hong, Yit Sing	Journal of Hydrology	2013
9	Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand	Voyde, Emily Fassman, Elizabeth Simcock, Robyn	Journal of Hydrology	2010

10	Event size, substrate water content and vegetation affect storm water retention efficiency of an un-irrigated extensive green roof system in Central Texas	Volder, Astrid Dvorak, Bruce	Sustainable Cities and Society	2014
11	Effect of vegetation biomass structure on thermal performance	Jim, C. Y.	Landscape and Ecological Engineering	2012
12	A review of green roof research and development in China	Xiao, Min Lin, Yaolin Han, Jie Zhang, Guoqiang	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2014

*Anexo 3. Información general de los artículos encontrados en paginas web con estudios internacionales relevantes para esta investigacion*

<b>MEDIOS VIRTUALES</b>				
<b>No</b>	<b>Nombre del Documento</b>	<b>Autor(es)</b>	<b>Año</b>	<b>Tema central del documento o artículo</b>
1	A Field Study Of Green Roof Hydrologic And Water Quality Performance	Hathaway, A. M. Hunt, W. F. Jennings, G. D.	2005	Evaluación del rendimiento hidrológico y remoción de contaminantes de agua proveniente de precipitación
2	Green Roof Storm Water Retention –Monitoring Results	Uhl, M. Schiedt, L.	2008	Evaluar los procesos que tienen lugar en la retención de un Techo Verde

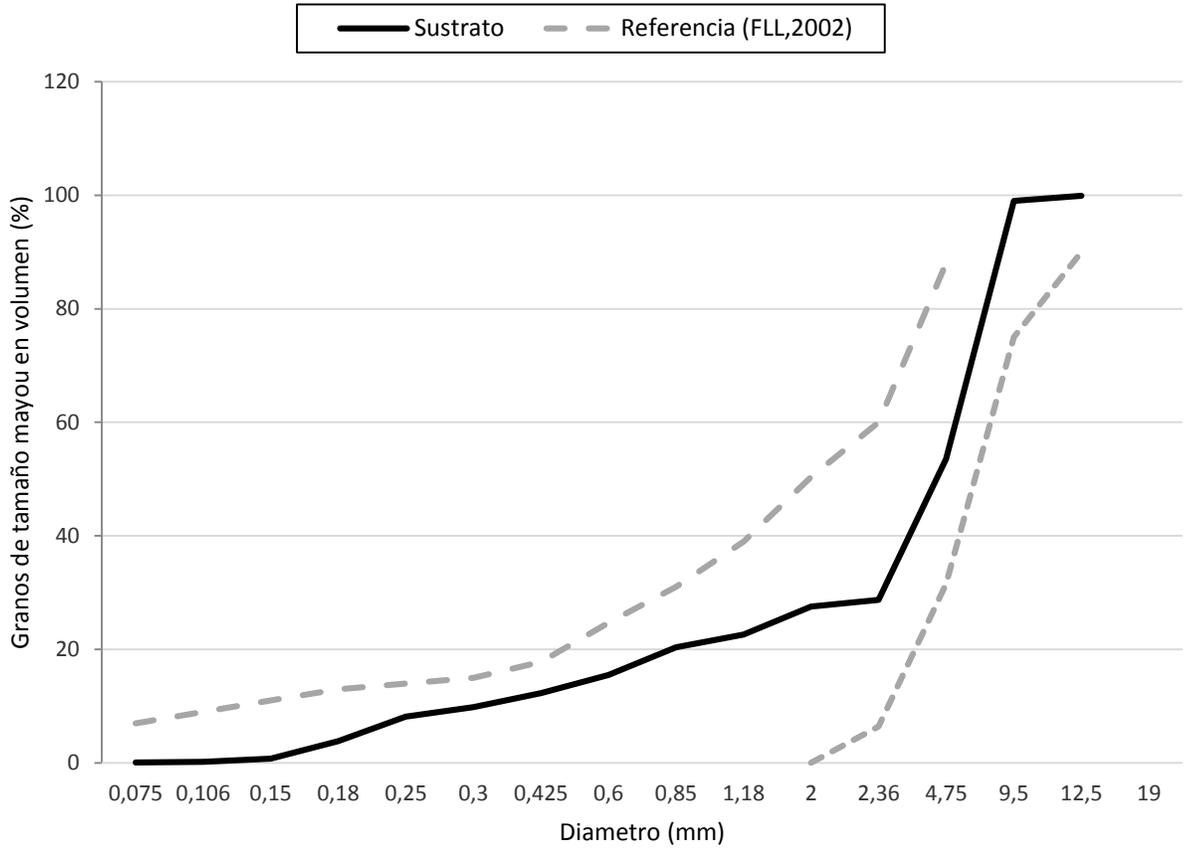
3	Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate	Simmons, Mark T. Gardiner, Brian Windhager, Steve Tinsley, Jeannine	2008	Comparación del rendimiento hidrológico y térmico de varios diseños de Techo Verde y techos reflectivos y no reflectivos.
4	The Thermal and Rainwater Runoff Performance of an Extensive Green Roof System	Carroll, Niall	2010	Determinar el rendimiento térmico de un Techo Verde comercial y su rendimiento hidrológico en comparación con la hoja del plexiglás (para replicar un panel fotovoltaico)
5	A North Carolina Field Study to Evaluate GreenRoof Runoff Quantity, Runoff Quality, and Plant Growth	Moran, Amy Hunt, Bill Jennings, Greg	2004	Evaluar el comportamiento hidrológico y la capacidad de reducción de contaminantes, así como el crecimiento de las plantas en un Techo Verde
6	The effects of large-scale green roof implementation on the rainfall-runoff in a tropical urbanized subcatchment. A Singapore case study	Van Spengen, Jim	2010	Evaluar el efecto a gran escala de la implementación de Techos Verdes en un sector urbano con clima tropical

*Anexo 4. Información general de los artículos encontrados en páginas web con estudios Nacionales relevantes para esta investigación*

<b>MEDIOS VIRTUALES</b>				
<b>No</b>	<b>Nombre del Documento</b>	<b>Autor(es)</b>	<b>Año</b>	<b>Tema central del documento o artículo</b>
1	Implementación de un Modelo de Techo Verde y su Beneficio Térmico en un Hogar De Honda, Tolima (Colombia)	De Rhodes V., Mateo	2012	Eficiencia de los Techos Verdes como una tecnología eficiente en la mitigación de los efectos del calentamiento global considerando las variables térmicas
2	Techos Verdes en Viviendas de Estrato 1: Aplicado al Barrio Yomasa	Villegas G., Paula	2014	Analizar la viabilidad de los beneficios otorgados al barrio Yomasa con la implementación de Techos Verdes
3	Sistema Productivo de Techos Verdes en Comunidades Vulnerables. Estudio de Caso en Barrio La Isla, Altos de Cazucá en Soacha, Cundinamarca	Forero C., Carolina Devia C., Carlos	2012	Cuantificar las ganancias económicas y aporte en hortalizas de los sistemas propuestos de Techo Verde.

Anexo 5. Granulometría del sustrato que conforma los Techos Verdes.

### Granulometría del Sustrato



Anexo 6. Ficha Técnica del Humus Sólido que compone el sustrato de los Techos Verdes.



Calle 79 B No. 70 - 16 Bogotá, D.C.  
 PBX: 223 1899  
 Fax: 223 4067  
 e-mail: agrilab@etb.net.co

Página 1 de 1  
 Laboratorio de Análisis Químicos  
 Insumos Agrícolas  
 Registrado ante el ICA según Resolución 000584

Remitente	Sr. MANUEL LEQUERICA		
Identificación suministrada	HUMUS SÓLIDO		
Descripción	Sólido Café	No. Laboratorio	MCO 12812
Fecha de Ingreso	16-sep-11	Fecha de Entrega	28 sep-11
<b>CARACTERIZACIÓN Y COMPOSICIÓN DE MATERIAL ORGÁNICO SÓLIDO</b>			
PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO
Humedad	10,3	%	GRAVIMÉTRICO (INTC 517)
Cenizas	41,7	%	GRAVIMÉTRICO (INTC 517)
Pérdidas por volatización	39,0	%	GRAVIMÉTRICO (INTC 517)
Carbono Orgánico Oxidable Total	13,8	%	VALOR POR CÁLCULO (INTC 517)
pH (pasta de saturación)	8,17		POTENCIOMÉTRICO
Densidad (Base Seca - 20°C)	1,75	g/cm <sup>3</sup>	GRAVIMÉTRICO (INTC 517)
Conductividad Eléctrica	11,0	dS/m	CONDUCTIMÉTRICO
Retención de humedad	84,7	%	GRAVIMÉTRICO (INTC 517)
Cap. Intercambio Cationico	35,1	(meq/100g)	VOLUMÉTRICO (INTC 517)
Relación C/N	11		
Nitrogeno (Norg+N-NH <sub>4</sub> +N-NH <sub>2</sub> )	1,31	%	KJELDAHL (INTC 517)
Fósforo Total (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1,77	%	COLORIMÉTRICO (INTC 517)
Potasio total (K <sub>2</sub> O)	0,78	%	ABSORCIÓN (INTC 517)
Cuero total (CaO)	15,5	%	ABSORCIÓN (INTC 517)
Magnesio total (MgO)	0,41	%	ABSORCIÓN (INTC 517)
Alúmina total	0,42	%	TURBIDIMÉTRICO (INTC 517)
Hierro total	0,36	%	ABSORCIÓN (INTC 517)
Manganeso total	288	p.p.m	ABSORCIÓN (INTC 517)
Cobre total	23	p.p.m	ABSORCIÓN (INTC 517)
Zinc total	151	p.p.m	ABSORCIÓN (INTC 517)
Boro total	18	p.p.m	COLORIMÉTRICO (INTC 517)
Sodio total	0,41	%	FOTOFOTOMETRÍA (INTC 517)
Silicio total SiO <sub>2</sub> (sólo soluble en HF)	15,4	%	ABSORCIÓN (INTC 517)
Residuo Insoluble en ácido	20,4	%	GRAVIMÉTRICO (INTC 517)

\* PRUEBA POSITIVA PARA CARBONATOS

**OBSERVACIONES: RESULTADOS EXPRESADOS EN BASE HÚMEDA**

1. Si usted tiene alguna inquietud, duda o reclamo sobre sus resultados, por favor comuníquese con el Director técnico o con el Coordinador de área.
2. El alcance de la responsabilidad de AGRILAB en el presente informe, se limita a la realización de los análisis de laboratorio relacionados y descritos anteriormente, más NO A GARANTIZAR los productos en su concepción, diseño, calidad y eficiencia.
3. Los resultados analíticos entregados en el presente informe corresponden exclusivamente a la muestra enviada por el cliente y no a otros materiales de la misma procedencia.
4. La contramuestra de la muestra a analizar se almacenará por un periodo de tiempo de 3 meses, luego será desechada.

ATENTAMENTE,  
  
 MYRIAM BENDECK LUGO  
 Química Directora Técnica PQ-1188

ADRIANA NAVARRO URDANETA  
 Lic. Química Coordinadora de Área

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA

*Anexo 7. Etapa constructiva de los sistemas de techo verde*



**Anexo 8.** Condiciones ( DIA 2) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera



*Anexo 9. Condiciones ( DIA 3) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera*



*Anexo 10. Condiciones ( DIA 4) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera*



*Anexo 11. Condiciones ( DIA 5) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera*



*Anexo 12. Condiciones ( DIA 6) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera*



*Anexo 13. Condiciones ( DIA 7) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera*



*Anexo 14. Condiciones ( DIA 8) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera*



**Anexo 15.** Condiciones ( DIA 9) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera



**Anexo 16.** Condiciones ( DIA 10) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera



*Anexo 17. Condiciones (DIA 11) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera*



*Anexo 18. Condiciones (DIA 12) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera*



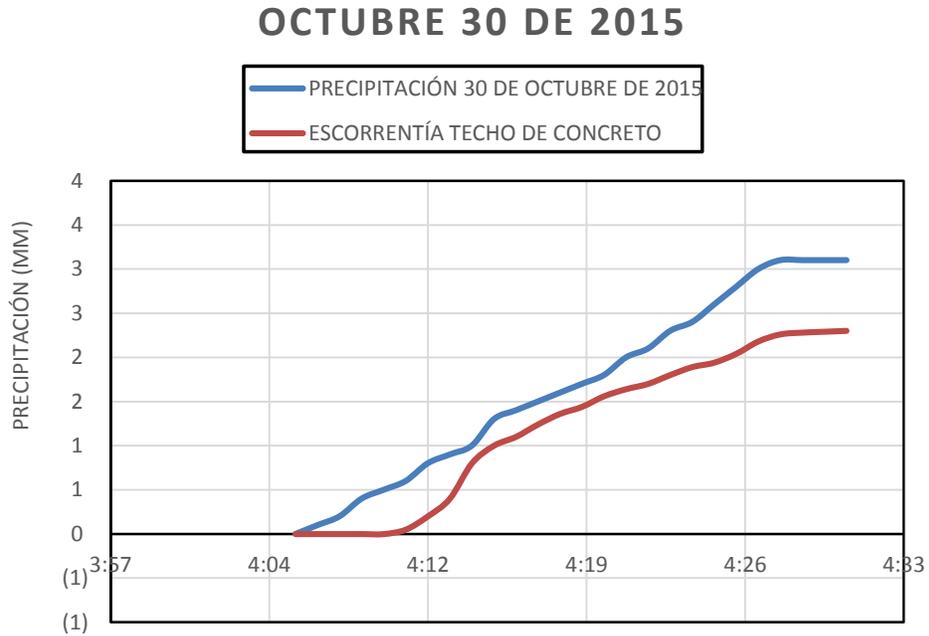
*Anexo 19. Condiciones (DIA 13) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera*



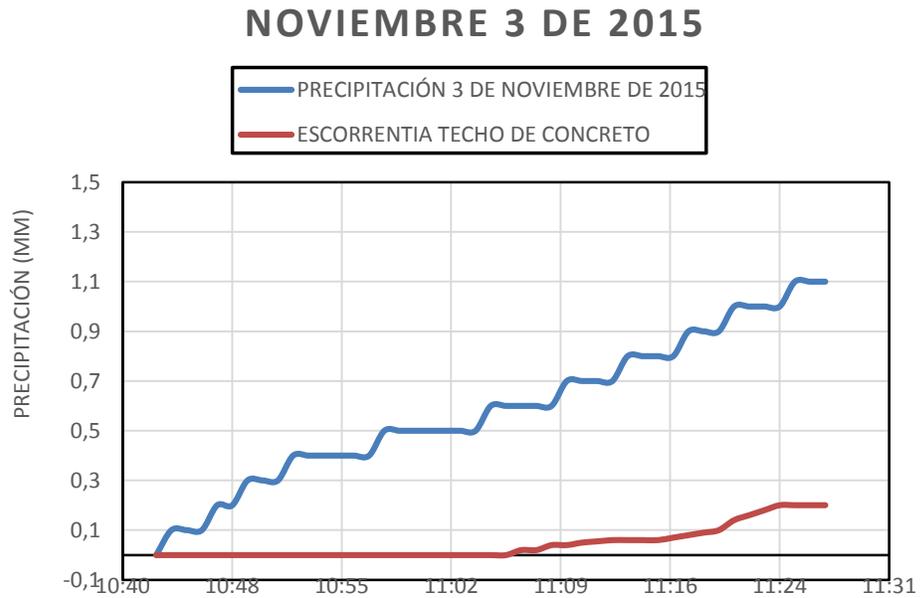
*Anexo 20. Condiciones (DIA 14) de las plantas nativas preseleccionadas. de izquierda a derecha; Dueranta, Barquito Morado, Cruz de Malta, Verdolaga, Mani Forrajero y Veranera*



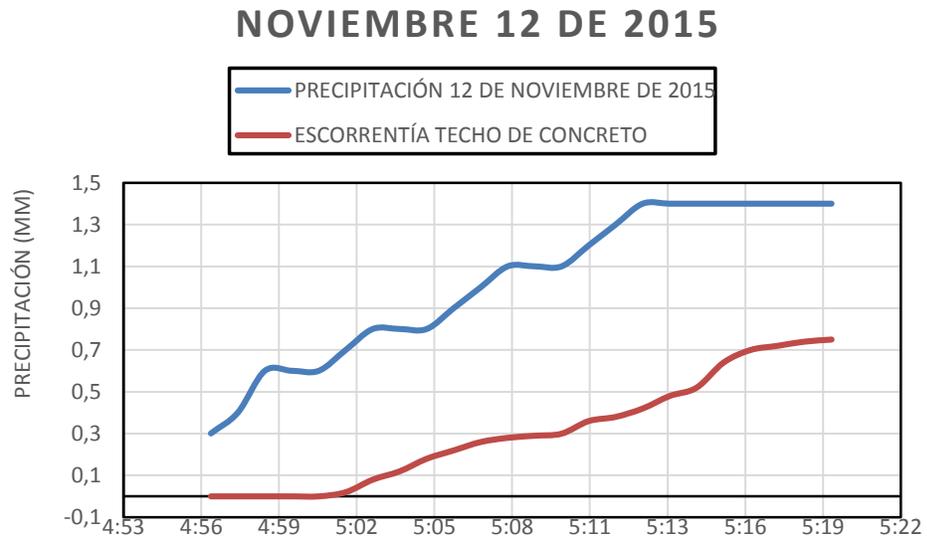
*Anexo 21. Resultados de precipitación y escorrentía presentados el día 30 de Octubre de 2015*



*Anexo 22. Resultados de precipitación y escorrentía presentados el día 3 de Noviembre de 2015*



*Anexo 23. Resultados de precipitación y escorrentía presentados el día 12 de Noviembre de 2015*



*Anexo 24. Resultados de precipitación y escorrentía presentados el día 16 de Noviembre de 2015*

