

**USO DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS SOBRE EDIFICACIONES COMO  
ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL**

**MARÍA FERNANDA SUÁREZ ESTEBAN**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2021**

**USO DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS SOBRE EDIFICACIONES COMO  
ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL**

**MARÍA FERNANDA SUÁREZ ESTEBAN**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR EL  
TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR DEL PROYECTO  
ING. MARGARETH VIECCO MARQUEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2021**

## **Dedicatoria**

Este proyecto de grado está dedicado a Dios que es mi fortaleza, a mi hijo Tomás que se convirtió en mi motivación más grande, a mis padres Oscar Fernando Suárez Puccetti y Elizabeth Pilar Esteban Torres quienes son todo para mí y sin ellos no estaría donde estoy.

## **Agradecimientos**

Le doy gracias a Dios por darme la vida y por permitirme llegar hasta este punto en donde puedo entregarles a mis padres Oscar Fernando y Elizabeth Pilar el título de Ingeniera Civil, también agradezco a mis padres por haberme acompañado en toda la carrera y estar para mí en los momentos más difíciles de mi vida, siendo ambos, el apoyo más grande con mi bebé.

A la universidad pontificia bolivariana seccional Bucaramanga y a la facultad de ingeniería civil por todas las enseñanzas y el aprendizaje recibido durante mi proceso educativo.

A mi directora de proyecto Margareth por haberme guiado y enseñado durante el proceso de mi proyecto de grado.

A toda mi familia que estuvo apoyándome para poder culminar mi proyecto de grado, en especial mi tía Claudia y su familia quien me dio su casa en momentos difíciles.

## Tabla de Contenidos

1.	Introducción .....	11
1.1	Delimitación del problema.....	13
1.2	Justificación .....	13
1.3	Alcance .....	14
1.4	Objetivos .....	15
1.4.1	Objetivo general.....	15
1.4.2	Objetivos específicos .....	15
2.	Estado del arte.....	16
3.	Marco teórico .....	20
3.1	Infraestructura verde .....	20
3.2	Techos verdes.....	20
3.3	Tipos de techos verdes .....	20
3.3.1	Intensivos .....	20
3.3.2	Semi intensivos .....	21
3.3.3	Extensivos .....	21
3.4	Beneficios de los techos verdes .....	22
3.4.1	Mejora la calidad del aire.....	22
3.4.2	Reducción de ruido .....	22
3.4.3	Gestión de aguas lluvias.....	22
3.4.4	Mejoramiento de la calidad del agua .....	23
3.4.5	Reducción de energía y mejora del clima en la estructura .....	23
3.4.6	Reducción del efecto de isla de calor.....	23
3.4.7	Mejoramiento estético y creación de hábitats .....	24
3.4.8	Beneficios sociales.....	24
3.6	Sustrato .....	25
3.7	Escorrentía .....	25
3.8	Evapotranspiración .....	27
3.9	Cuenca.....	27
3.10	Drenajes urbanos.....	28
3.11	Sistemas urbanos de drenaje sostenible .....	28

3.12	Técnicas de desarrollo de bajo impacto (LID)	28
3.13	GIFMOD	29
4.	Metodología	30
4.1	Datos históricos de lluvia	31
4.2	Determinar el tipo de sustrato y vegetación de un techo verde extensivo	32
4.2.1	Sustrato	32
4.2.2	Vegetación	38
4.3	Ensayos experimentales	41
4.3.1	Lisímetro	41
4.3.2	Ensayos de evapotranspiración a partir del lisímetro	47
4.4	Determinar el software de modelación	48
4.5	Comparación entre un techo convencional y un techo verde	54
4.5.1	Techo convencional	54
4.5.2	Techo verde	56
4.6	Análisis de viabilidad técnica	59
5.	Resultados y discusión	67
5.1	Lisímetro	67
5.1.1	Adaptación de las plantas al nuevo sustrato	67
5.1.2	Porcentaje de humedad de sustrato	68
5.1.3	Resultados de evapotranspiración e infiltración a partir del lisímetro	69
5.1.3.1	Evapotranspiración	69
5.2	Modelo en GIFMOD	73
5.2.2	Evapotranspiración	77
5.3	Comparación entre un techo convencional y un techo verde	79
5.3.1	Techo convencional	79
	.....	79
5.3.2	Techo verde	80
5.3.3	Diferencia de caudales	82
5.4	Viabilidad técnica	84
6	CONCLUSIONES	89
	Referencias	92
	ANEXOS	97

## Lista de tablas

Tabla 1. Precipitaciones diarias .....	46
Tabla 2 Intensidad de lluvia en mm/día – relación entre la estación pluviométrica y el pluviómetro experimental .....	47
Tabla 3. Matriz comparativa de programas de modelación hidrológica.....	49

## Lista de figuras

Figura 1. Tipos de techos verdes.....	21
Figura 2. Presencia de lluvia en cubiertas convencionales .....	26
Figura 3. Presencia de lluvia en cubiertas verdes .....	27
Figura 4. Uso de techos verdes extensivos sobre edificaciones como estrategia de reducción de escorrentía superficial.....	31
Figura 5. Contenido de materia inorgánica.....	34
Figura 6. Contenido de materia orgánica.....	36
Figura 7. Factores para determinar el tipo de sustrato en un techo verde extensivo.....	37
Figura 8. Sustrato seleccionado .....	37
Figura 9. Vegetación seleccionada.....	40
Figura 10. Adaptación de las especies al nuevo sustrato .....	44
Figura 11. Pluviómetro experimental.....	45
Figura 12. Propuesta de techo verde .....	57
Figura 13. Cubierta verde en Ruitoque Condominio .....	60
Figura 14. Presupuesto de cubierta verde .....	62
Figura 15. Capas de una cubierta verde .....	64
Figura 16. Camellia Sinensis (Té).....	67
Figura 17. Duranta Erecta (Duranta).....	68
Figura 18. Evapotranspiración de todas las especies durante los días de lisímetro – Sustrato Vermiculita + Compost .....	69
Figura 19. Evapotranspiración de todas las especies en los días de lisímetro – Sustrato Perlita + Turba ..	69
Figura 20 Evapotranspiración de la ixora vs evapotranspiración de gifmod .....	71
Figura 21. Infiltración de las especies en los días de lisímetro – Sustrato Vermiculita + Compost .....	72

Figura 22. Infiltración de las especies en los días de lisímetro – Sustrato Perlita + Turba.....	72
Figura 23. Software GIFMOD .....	73
Figura 24. Software GIFMOD – Bloques de sustrato y vegetación .....	74
Figura 25. Software GIFMOD – Unión de planta y sustrato .....	74
Figura 26. Radiación – GIFMOD .....	75
Figura 27. Humedad – GIFMOD.....	76
Figura 28. Temperatura – GIFMOD.....	76
Figura 29. Viento – GIFMOD.....	77
Figura 30 Evapotranspiración con papa como cultivo de siembra en un área de 100 m2 teniendo en cuenta la precipitación suministrada por la estación meteorológica LA GRANJA, ubicada en el municipio de Piedecuesta.....	78
Figura 31. Matriz para hallar el caudal de un techo convencional utilizando el método racional .....	79
Figura 32 Infiltración de plantas para la especie CLHOROPHYTUM COMOSUM.....	81
Figura 33 Infiltración de plantas para la especie IXORA .....	81
Figura 34 Caudal del espacio en concreto del techo verde utilizando el método racional.....	82
Figura 35 Matriz comparativa de caudales según la tipología de techos .....	83
Figura 36 Gráfica de comparación de caudales entre un techo convencional y un techo verde .....	83
Figura 37 Porcentaje de caudal en un evento de mayor precipitación.....	84
Figura 38 Presupuesto de cubierta verde con los valores de TOXEMENT .....	85
Figura 39 Metodología CBA .....	86
Figura 40 Importancia de cada ventaja para la metodología CBA .....	87

## **Lista de anexos**

Anexo A. Registro fotográfico de la realización del lisímetro .....	97
Anexo B. Tablas y gráficas del lisímetro de la especie CHLOROPHYTUM COMOSUM .....	103
Anexo C. Tablas y gráficas de lisímetro de la especie CAMELLIA SINENSIS .....	106
Anexo D. Tablas y gráficas de lisímetro de la especie DURANTA ERECTA .....	109
Anexo E. Tabla y gráficas de lisímetro de la especie IXORA.....	112

**RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:** USO DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS SOBRE EDIFICACIONES COMO ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

**AUTOR(ES):** MARÍA FERNANDA SUÁREZ ESTEBAN

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** MARGARETH VIECCO MARQUEZ

**RESUMEN**

Uno de los principales beneficios de los techos verdes es el manejo de la escorrentía superficial; para esto es indispensable tener el conocimiento de cuáles plantas son las más óptimas para implementarlas en la gestión de aguas lluvias, teniendo la capacidad de disminuir las mismas por medio de la evapotranspiración; además es importante implementar un sustrato que presente esta dinámica asistiendo a la vegetación en la disminución de la escorrentía. El objetivo principal de este proyecto es evaluar el impacto del uso de techos verdes extensivos sobre edificaciones como estrategia de reducción de escorrentía superficial a partir de la implementación de uso de un modelo hidrológico en una cuenca urbana; en donde se empezó realizando una revisión bibliográfica sobre los techos verdes extensivos para encontrar el sustrato y la vegetación más acertada aplicándola en un ensayo de lisímetro y se realizó una simulación en un modelo hidrológico para observar la evapotranspiración de un techo verde según las precipitaciones diarias de los días del lisímetro. Se realizó una comparación entre el caudal de aguas lluvias de un techo verde y un techo convencional, utilizando la información del lisímetro para el techo verde y el método racional para el techo convencional. Finalmente obtuvimos los resultados para poder manifestar la viabilidad técnica de un techo verde en la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana.

**PALABRAS CLAVE:**

ESCORRENTÍA, INFRAESTRUCTURA VERDE, ARQUITECTURA Y ESTÉTICA, INVESTIGACIÓN

**V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**

**GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** USE OF EXTENSIVE GREEN ROOFS ON BUILDINGS AS A STRATEGY TO REDUCE SURFACE RUNOFF

**AUTHOR(S):** MARÍA FERNANDA SUÁREZ ESTEBAN

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR:** MARGARETH VIECCO MARQUEZ

**ABSTRACT**

One of the main benefits of green roofs is the management of surface runoff; For this it is essential to have the knowledge of which plants are the most optimal to implement them in the management of rainwater, having the ability to reduce them through evapotranspiration; It's also important to implement a substrate that presents this dynamic, assisting the vegetation in reducing runoff. The main objective of this project is to evaluate the impact of the use of extensive green roofs on buildings as a strategy to reduce surface runoff from the implementation of the use of a hydrological model in an urban basin; where a bibliographic review on extensive green roofs was carried out to find the most suitable substrate and vegetation by applying it in a lysimeter test and a simulation was carried out in a hydrological model to observe the evapotranspiration of a green roof according to the daily rainfall of the days of the lysimeter. A comparison was made between the rainwater flow of a green roof and a conventional roof, using the information from the lysimeter for the green roof and the rational method for the conventional roof. Finally, we obtained the results to be able to demonstrate the technical feasibility of a green roof in the city of Bucaramanga and its metropolitan area.

**KEYWORDS:**

RUNOFF, GREEN INFRASTRUCTURE, ARCHITECTURE AND AESTHETICS,  
INVESTIGATION

**V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK**

## 1. Introducción

Una de las grandes problemáticas en el mundo son las inundaciones que se presentan por las fuertes precipitaciones que genera el cambio climático; lo que se ha buscado no solo en Colombia, sino en el mundo es poder controlar y gestionar las aguas lluvias para así poder darle mejores beneficios y utilidad a dicha agua.

Para la actual generación es muy importante darles provecho a las novedades de construcción; aunque la infraestructura verde no sea tan novedosa en el mundo, en Colombia la empezaron a implementar a mediados del 2010.

La infraestructura verde es infraestructura en donde se utiliza vegetación y suelo y conlleva varios tipos según el lugar donde se desea implementar; es decir, existen pavimentos porosos, muros verdes, cubiertas verdes, entre otros.

Las cubiertas verdes son un tipo de infraestructura verde y se clasifican en 3 tipos de cubiertas según el espesor de sustrato, intensivas tienen un espesor entre los 20 y 200 cm, semi intensivas varía entre los 15 y 30 cm y las extensivas tienen un espesor de sustrato menor a los 15 cm.

Para la modelación hidrológica computacional, existen softwares donde pueden mostrar la simulación de gestión de esorrentía en una infraestructura verde según el tipo, el clima, el suelo y la planta a utilizar.

Las plantas y el sustrato hacen un papel muy importante porque de ellos depende el manejo de agua, por la absorción, infiltración y evapotranspiración. Para poder mitigar las inundaciones en Bucaramanga y su área metropolitana se plantea la solución de una cubierta verde extensiva, que se diferencia de las demás porque el espesor del sustrato es menor a 15 cm y su carga es más ligera, en donde, se propusieron dos tipos de sustratos con 4 tipos de especies diferentes para este clima por medio de una serie de investigaciones, realizándose un lisímetro para hallar la

evapotranspiración de las plantas y la absorción del sustrato y poder rectificar cuál sería el sustrato con la vegetación más acorde a la gestión de escorrentía superficial; además se realiza un modelo hidrológico, el cual el software es escogido por medio de una matriz comparativa mostrando los diferentes softwares posibles que presenten las aplicaciones de infraestructura verde y gestión de escorrentía superficial para hacer una comparación entre los resultados de evapotranspiración del lisímetro y del modelo hidrológico.

Se hace una comparación entre un techo convencional y un techo verde utilizando el método racional para hallar el caudal de un techo convencional con un área de 100 m<sup>2</sup> y con una propuesta de techo verde de 100 m<sup>2</sup> se halla el caudal según los resultados de infiltración del lisímetro con la vegetación y sustrato más óptimo, ejecutando así la comparación entre ambos techos.

Se realiza un análisis de viabilidad técnica con la investigación en dos empresas encargadas de la construcción de cubiertas verdes, las cuales son CASA AMBIENTE SAS y TOXEMENT; la primera se encarga de realizar toda la cubierta incluyendo vegetación y el sustrato, la segunda se encarga de hacer todas las capas exceptuando el sustrato y la vegetación.

En este proyecto se encuentra una recopilación de información de sustratos y vegetación para cubiertas verdes extensivas, el desarrollo del lisímetro experimental junto con el pluviómetro, la simulación de una cubierta verde en un software novedoso, presupuesto de una cubierta verde de 100 m<sup>2</sup> según la empresa CASA AMBIENTE SAS y un presupuesto de la propuesta de techo verde de 100 m<sup>2</sup> con los precios de TOXEMENT y para el sustrato y la vegetación sacaron los precios del vivero LA ESPAÑOLITA; las referencias que se utilizaron para este proyecto y los anexos como lo son fotografía, las tablas y gráficas del lisímetro experimental de cada una de las especies con su sustrato.

## **1.1 Delimitación del problema**

En el área metropolitana de Bucaramanga en el departamento de Santander por su composición geográfica, posee variedad de fuentes hídricas como ríos y quebradas y en el momento que se presentan fuertes lluvias ocasionan inundaciones en varios sectores del municipio causando daños materiales, destruyendo edificaciones, cosechas, maquinaria y hasta provocando pérdidas de vida humana.

En el sector de la construcción cada vez está tomando nuevos horizontes, en este caso, se está ampliando cada vez más por la misma demanda de población, hacia las zonas rurales del país; haciendo que a la vez aumenten las inundaciones en sectores poblados, por la cercanía que se tienen a las fuentes hídricas y por los mismos cambios de las construcciones al cambiar el suelo por asfalto, concreto, etc.

Los techos verdes, son una de las tantas técnicas que se implementan para la gestión de aguas, en donde incluye el manejo de escorrentías superficiales; además, los techos verdes son beneficiosos para la sostenibilidad de un país o de una ciudad y trae beneficios económicos, sociales y ambientales.

Hay varios aspectos importantes que se deben tener en cuenta a la hora de construir un techo verde, dentro de los cuales están el tipo de sustrato, el cual debe tener excelente capacidad de retención de agua; el tipo de vegetación que se quiere sembrar, la cual debe tener una elevada evapotranspiración y el tipo de techo verde que se necesita construir. Lo anterior da paso para la siguiente pregunta de investigación ¿Qué potencial tienen el sustrato y la vegetación utilizada en techos verdes extensivos para la gestión de escorrentía superficial en la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana?

## **1.2 Justificación**

La implementación de cubiertas verdes genera grandes beneficios en cualquier parte del mundo, y dependiendo del tipo de necesidad se busca un sustrato y una vegetación adecuada; en este caso, se pretende solucionar la problemática de inundaciones y daños que presentan las aguas lluvias tanto en las vías como en las edificaciones ya sean casas o edificios.

Los techos verdes no sólo ayudan a gestionar la escorrentía superficial sino también ayudan a disminuir la isla de calor en las ciudades, mejoran la calidad del aire y del agua, hacen ver más vivas las ciudades con su arquitectura y estética, ayudan a reducir la temperatura, entre otros; como lo demuestran estudios realizados como el caso del análisis de vanguardia de los beneficios ambientales de los techos verdes, realizado por Berardi et al. (2013) quienes afirman la importancia de la aplicación de techos verdes en la construcción de edificios, lo que permite mejoras sustanciales que impactan de forma positiva no solo en el proceso constructivo, sino a las comunidades y aporta al embellecimiento de las ciudades, lo que también implica que la ingeniería civil es una ciencia y una disciplina que propende por el cuidado y el favorecimiento de la ecología mundial. Esto significa que un techo verde es una gran inversión tanto para la constructora como para las personas de esa zona y ratifica la importancia del proyecto entorno a los beneficios de incorporar esta técnica en la construcción moderna.

### **1.3 Alcance**

El alcance del presente proyecto corresponde a la aplicación de un ensayo demostrando que las cubiertas verdes tienen mayor beneficio para el aprovechamiento de las aguas lluvia, disminuyendo la escorrentía superficial, gracias a la identificación e incorporación de vegetación con sustrato apropiado en los techos de las viviendas o edificaciones que mitigue y aproveche el exceso de lluvias. Se realizó la ejecución de una simulación en el software Gifmod sobre las correntías superficiales en un techo verde usando un cultivo de papa, para posteriormente hacer

una comparación con el ensayo experimental con el lisímetro, y al final se realizó una propuesta de techo verde utilizando dos especies de vegetación (*Ixora* y *Chlorophytum comosum*) que presentan un coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) similar a la papa logrando la comparación y obteniendo resultados viables para la implementación de techos verdes en los procesos constructivos de edificaciones modernas.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Evaluar el impacto del uso de techos verdes extensivos sobre edificaciones como estrategia de reducción de escorrentía superficial a partir de la implementación de uso de un modelo hidrológico en una cuenca urbana.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Determinar el tipo de sustrato y vegetación presente en un techo verde extensivo por medio de revisión bibliográfica y realizando un lisímetro para hallar la evapotranspiración y la infiltración experimental en el tipo de vegetación.
- Aplicar los datos en un modelo hidrológico que establezca la relación entre flora/sustrato usando una herramienta que considere la dinámica del agua en una cubierta verde.
- Elaborar una comparación entre una cubierta convencional y una cubierta verde extensiva a partir de un evento de mayor precipitación, mostrando los porcentajes de reducción de escorrentía superficial.
- Realizar un análisis de viabilidad técnica de la implementación de cubiertas verdes extensivas sobre edificaciones considerando la gestión de escorrentía superficial.

## 2. Estado del arte

En la última década las investigaciones y los estudios que se han ejecutado sobre las cubiertas verdes aumentaron de manera significativa. En Cascone (2019) se pueden encontrar varias investigaciones a nivel mundial sobre los techos verdes, como la de Berndtsson que hizo una revisión sobre la calidad y la cantidad de agua como drenaje urbano, incluyendo la afectación de elementos químicos como el fósforo, nitrógeno y metales pesados dentro de la calidad del agua lluvia en la vegetación del techo verde; Castleton y Saadatian et al, en sus investigaciones abordaron temas del beneficio de la disminución de energía en las cubiertas verdes; en la revisión de Berardi y col se pueden encontrar los beneficios de las cubiertas verdes enfocados en el efecto de la isla de calor urbana, mejora en la calidad del aire, gestión del agua, aislamiento acústico y la preservación ecológica; Hashemi, en el 2015 mostró los efectos que presentan la calidad de la esorrentía y la reducción del consumo de energía; Cascone et al realizó una investigación más profunda sobre cómo el proceso de evapotranspiración influye en el enfriamiento del edificio. Cascone (2019) muestra las cubiertas verdes como una tecnología ecológica primeramente analizando los antecedentes sobre los beneficios de los techos verdes y examinar más a fondo la composición de las cubiertas verdes con sus capas.

El continuo crecimiento de ciudades hace que aumente las superficies impermeables, lo cual está generando una grave alteración del ciclo natural del agua, aumentando los problemas relacionados con el drenaje y la gestión del agua pluvial. Esto debido a que en grandes áreas de superficie impermeables el porcentaje de infiltración de esorrentía es cerca al 5% a comparación de superficies a campo abierto donde la infiltración está cerca del 95 %. A esto hay que añadir que los sistemas de drenaje convencionales solucionan el problema en la zona de afectación de inundaciones, pero no aguas abajo, están quedando obsoletos (Trapote Jaume & Fernández

Rodríguez, 2016). Y poniendo en riesgo los cuerpos de agua que reciben las aguas de los drenajes esto debido a que la turbulencia aumenta y el cauce puede sufrir socavación, Por estos motivos surge una nueva forma de tratar el agua pluvial, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Estos son una gran variedad de sistemas que captan e infiltran/almacenan el agua pudiendo aprovecharla para diversos usos (Trapote Jaume & Fernández Rodríguez, 2016).

En Melbourn - Australia en el año 2019, Soil Constraints And Low Impact Development (2020) llevó a cabo la investigación “La implementación es más que una instalación”: un estudio de los desafíos en la implementación de proyectos de infraestructura verde en dos escuelas primarias australianas el cual habla acerca de los servicios que puede ofrecer una infraestructura verde en personas y en el ambiente y dice que una infraestructura verde no es solo instalarla si no que funcione.

Las ciudades y los centros urbanos están creciendo a una escala sin precedentes, este aumento desmesurado de población es una preocupante tendencia que se ve representada en la temperatura, las particularidades del clima del territorio colombiano tiene gran variación debido a la distribución mundial de energía y masa por lo que es común encontrar zonas tropicales, las cuales tienen grandes cantidades de energía solar lo que hace que el comportamiento diario de las plantas sea positivamente alterados por la evapotranspiración y sombra de la vegetación la cual debe ser seleccionada según las características y morfología del lugar (Herrera Hurtado, 2019).

Los componentes que pueden determinar una disminución en la variación microscópica de la temperatura son mediante uso de infraestructura verde; la cual permita la variación, a través de especies nativas y suelos propios del ecosistema, como mecanismo que contribuya con los procesos de restauración ecológica urbana y el aumento de la biodiversidad. Así mismo el cambio climático propicia impactos a los cuales se enfrentan las poblaciones como, por ejemplo, las olas

de calor, las sequías, las inundaciones. Adicionalmente, los habitantes de los centros urbanos experimentarán aumento en la temperatura como consecuencia del efecto de isla de calor, el cual es producido por la generación de calor solar, almacenado en las construcciones, y emitido lentamente (Betancur Quiceno, 2017).

Con los SUDS se pudo comprobar que las cubiertas verdes son un excelente apoyo para el sistema de drenaje de la ciudad de Bogotá; mientras que un techo convencional deja pasar entre un 30% y 50 % de la escorrentía urbana en ciudades desarrolladas, los techos verdes logran disminuir la escorrentía hasta un 82,9% (León Fandiño, 2014).

Una gran ayuda para mitigar las inundaciones en zonas urbanas es la infraestructura verde; en el caso de la localidad de Chapinero en Bogotá, se sustituyeron los techos convencionales existentes por cubiertas verdes, empleando un modelo computacional en el software SWMM. Se construyó un tipo de prototipo de techo verde donde se analizó el antes y el después de la filtración al sustrato y al tipo de vegetación, la calidad de agua lluvia y donde se pudo determinar los factores que constituyen las aguas lluvias para controlar la calidad del agua (Villegas González & Contreras Bejarano, 2019).

Para un caso del municipio de Piedecuesta se utilizó infraestructura verde como propuesta para mitigar las inundaciones que se presentan en el separador vial comprendido entre la vía Floridablanca – Piedecuesta, realizando una simulación con un modelo hidrológico computacional y realizando ensayos experimentales como un lisímetro y una granulometría de la vegetación y el sustrato presente en la zona; según Hernández (2020), se obtuvieron los resultados de la evapotranspiración del ensayo del lisímetro y de la simulación en Gifmod, en donde se muestra que el lisímetro presenta una mayor ETo que la del Gifmod, con un promedio de 5,12 mm/día mientras que la del Gifmod es de 2,75 mm/día.

Se puede encontrar vegetación que se utiliza en techos y muros verdes para la gestión de escorrentía superficial en la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana en el proyecto de grado de Quintero y Valcarcel (2020), en donde estudian la vegetación cultivada en los techos y muros verdes existentes en la ciudad de Bucaramanga.

### **3. Marco teórico**

En este capítulo se presentan todas las definiciones que se utilizaron durante el proceso de este proyecto de grado.

#### **3.1 Infraestructura verde**

Como nueva propuesta de paisajismo, según Betancur (2017) crece el concepto de infraestructura verde el cual da un enfoque en una red interconectada de espacios verdes que tienen particularidades y funciones los cuales son provechosos para los ecosistemas naturales y a su vez trae beneficios a la población, dentro de la funcionalidad de esos sistemas verdes se destaca el desarrollo y conservación del suelo. Los proyectos de infraestructura verde incluyen desde techos verdes, jardines verticales, viaductos, separadores viales hasta los simples proyectos locales que impliquen el manejo adecuado del recurso hídrico.

#### **3.2 Techos verdes**

Para Rodríguez (2016) Son básicamente techos plantados con vegetación encima de un medio físico de crecimiento, de considerar hoy en día los techos verdes están en vanguardia y crecimiento, pero estos tienen sus orígenes en Babilonia donde se destacaban los grandes jardines en prominentes edificaciones; los techos verdes modernos manejan este mismo principio sin embargo se maneja una gran variedad de tecnología más avanzada que permite que los techos verdes sean más eficientes prácticos y beneficiosos.

#### **3.3 Tipos de techos verdes**

##### **3.3.1 Intensivos**

Como lo presenta Rodríguez (2016), estos sistemas requieren un riego regular, y un elaborado sistema de drenaje. Estas cubiertas son generalmente accesibles al público y de alto costo de

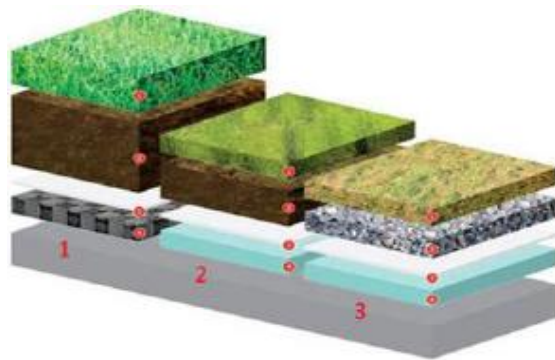
mantenimiento anualmente. Muchos de los diseños de estas cubiertas incluyen la gestión del agua de lluvia e incluso algunos de los sistemas implementan la escorrentía para el riego.

### 3.3.2 Semi intensivos

Así mismo, Rodríguez (2016) Se caracteriza por una mayor variedad vegetal, comparado con los sistemas extensivos. Puede sustentar plantas herbáceas. Requiere de un mantenimiento moderado y, ocasionalmente, de riego. Este sistema puede retener más agua de tormenta que una cubierta extensiva y proporciona una mayor riqueza ecológica.

### 3.3.3 Extensivos

Según Rodríguez (2016), se caracterizan por ser ligeros, con un sustrato de reducido espesor y poca concentración de nutrientes. En general se necesitan plantas resistentes con pocos requerimientos de agua, fertilizantes o de la adición de nutrientes más allá de los que obtienen de forma natural del sustrato, y demandan un mantenimiento mínimo, como se muestra en la figura 1.



*Figura 1. Tipos de techos verdes*

Fuente: Modelación hidrológica de techos verdes productivos (Aguirre, Morera , & Torres, 2014)

### **3.4 Beneficios de los techos verdes**

#### **3.4.1 Mejora la calidad del aire**

Según García y Vega (2012), está comprobado que las plantas mejoran la calidad del aire, ya que retienen el polvo y partículas dañinas adhiriéndolas a ellas.

Para Quintero y Valcarcel (2020) existen 2 factores dentro del beneficio de la mejoría en la calidad del aire, dentro de los cuales está la captura de partículas en donde depende de la especie y su área foliar, el segundo factor es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), las especies necesitan de CO<sub>2</sub> para crecer, aunque la cantidad varía dependiendo de la edad de la especie, por ejemplo, en su primera etapa absorben grandes cantidades y rápidamente.

#### **3.4.2 Reducción de ruido**

Para García y Vega (2012), las cubiertas verdes al estar conformadas por sustrato, vegetación y capas de aire suministran una barrera protectora permitiendo que se absorban una parte de las ondas por las plantas y el sustrato y la otra parte es desviada; determinando que las cubiertas verdes ocasionan un aislamiento térmico que excede los 10 decibeles.

#### **3.4.3 Gestión de aguas lluvias**

Como plantean Shafique et al. (2020) la vegetación y el sustrato son de gran ayuda para disminuir las inundaciones en las zonas urbanas; ya que éstos tienen la capacidad de almacenar y retener agua. La función del sustrato es absorber gran cantidad del agua para que la vegetación realice el proceso de evapotranspiración y a su vez lo aumente expulsando el agua retenida. Es necesario al escoger el tipo de planta verificar adecuadamente la evapotranspiración de ésta.

Las especies que más se recomiendan para este beneficio son las hierbas y pastos porque presentan las características físicas adecuadas como lo son una mayor biomasa en la raíz, gran altura y tallos más largos.

Según Berardi et al. (2013) las investigaciones muestran que los techos verdes disminuyen la escorrentía hasta un 60% para los extensivos y un 100% para los intensivos; también existe otra donde el valor de la mitigación de escorrentía varía entre el 25% y 50%.

#### **3.4.4 Mejoramiento de la calidad del agua**

Según Shafique et al. (2020) el sustrato al almacenar y retener el agua; retiene unos contaminantes y metales que se encuentran dentro de la escorrentía superficial, mejorando así su calidad.

#### **3.4.5 Reducción de energía y mejora del clima en la estructura**

Para Shafique et al. (2020) los techos verdes reducen la temperatura de la estructura ya que adicionan resistencia térmica, causando el enfriamiento del edificio; y según lo que hace que no sea necesario la instalación de aires acondicionados, reduciendo así los costos y la energía del edificio. Esto se debe a que la cubierta verde recibe sombra por parte de la cubierta evitando las radiaciones solares directas. Y según Berardi (2013) la energía puede disminuir entre un 2% y un 48% según un estudio realizado en Grecia.

#### **3.4.6 Reducción del efecto de isla de calor**

Según Quintero y Valcarcel (2020) el fenómeno de isla de calor quiere decir que dentro de una ciudad se forma como una especie de cúpula de aire cálido, presentando una transformación en el contenido de calor y una variación en la presión atmosférica, vientos, precipitación y procesos meteorológicos extremos, esto por la cantidad de edificios en concreto sin vegetación.

En este sentido García y Vega (2012) plantean que gracias al comportamiento térmico de la vegetación presente en la cubierta verde, las especies absorben el calor y lo utilizan por medio de la evapotranspiración reduciendo así el efecto de isla de calor.

### **3.4.7 Mejoramiento estético y creación de hábitats**

Según Shafique et al. (2020) las cubiertas verdes hacen que la zona urbana mejore su estética ya que le dan un poco de vida a las ciudades mostrando el lado de la naturaleza, ayudando a especies silvestres y a la conservación de la biodiversidad en las zonas urbanas, y plantea García y Vega (2012) se logran crear hábitats en mejores condiciones para dichas especies.

### **3.4.8 Beneficios sociales**

Plantea Shafique et al. (2020) las cubiertas verdes también tienen beneficios en la comunidad, ya que no solo puede integrar al tener un espacio donde se pueda respirar o un descanso, sino que también sirve para plantar cultivos como hortalizas, pimentones, entre otros; generando un alto crecimiento en la agricultura urbana.

## **3.5 Vegetación**

Para Trujillo (2016) los techos verdes extensivos requieren de sistemas de riego simples, debido a que necesitan plantas resistentes con pocos requerimientos de agua por lo que la clasificación y elección de las plantas puede ser el factor de éxito o fracaso de un sistema lo ideal para los techos verdes es tener plantas capaces de soportar grandes sequías o grandes comportamientos de estrés hídrico lo que hace la viabilidad de las plantas es conocer las condiciones climáticas de cada lugar y la eficiencia del sistema. Para la escogencia de plantas de una cubierta verde es muy importante tener en cuenta la evapotranspiración y el coeficiente de cultivo  $K_c$  que es calculado por la misma.

En el proyecto de grado de Quintero y Valcarcel (2020), se puede encontrar los distintos factores para determinar el  $K_c$  como el tipo de cultivo en donde incluye la altura de la especie, la rugosidad de la superficie y el espacio entre cada planta; el clima en donde la variación de la velocidad del viento afecta en el valor del  $K_c$  ya que tiene un gran cambio en el valor de la resistencia aerodinámica; y como último factor se encuentra la evaporación del suelo ya que la diferencia de

valores entre la evaporación del sustrato y la transpiración del cultivo están integrados dentro de la fórmula del Kc.

### **3.6 Sustrato**

Para Trujillo (2016) el componente más importante de un techo verde es la diversa mezcla de materia orgánica para tener sistemas de cubiertas vegetadas más efectivas, esto debido que son sistemas con parámetros de profundidad y tamaños de partículas lo que permite el pH adecuado para el crecimiento de la vegetación, de ahí la importancia de tener diversidad de muestras en el sustrato como materiales orgánicos, arenas; la cantidad de agua que escurre por área de techo depende de la porosidad y conductividad del sustrato.

En ese sentido Basbaro et al. (2017) Según Los techos verdes extensivos se diferencian de los demás tipos de techos porque su espesor varía entre los 8 y 15 cm, tienen un mantenimiento bajo y su peso varía entre los 110 y 140 Kg por  $m^2$ , es necesario que el sustrato tenga una alta porosidad con aire con poca capacidad de retención de agua para favorecer un drenaje rápido. Para que un sustrato tenga las características mencionadas anteriormente, debe comprender entre el 80 y el 100% de materia inorgánica y hasta un 20% de material orgánica.

Componentes para sustratos de techos verdes: Piedra pómez, arcilla expandida, perlita expandida, vermiculita, cenizas volcánicas, arenas, zeolitas, residuos de construcción, turbas y compost diversos.

### **3.7 Escorrentía**

Para Ayala y Vargas (2014) es una fase del ciclo hidrológico o del ciclo del agua, que muestra el comportamiento del agua; el cual conecta las nubes con la superficie terrestre.

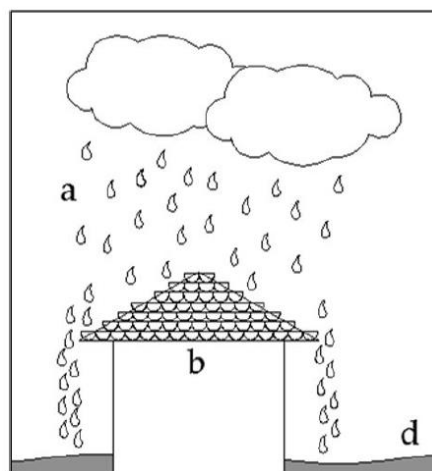
El ciclo consiste: el vapor de agua contenido en las nubes se convierte en precipitación, la cual cae en la superficie terrestre incluyendo la superficie de la vegetación en donde una parte se

evapora por medio del suelo o a través de las plantas realizando el proceso de evapotranspiración; la otra parte se infiltra a través del suelo para suministrar las aguas subterráneas. Otra parte del agua lluvia se mantiene en actividad sobre la superficie terrestre y ésta la denominamos Escorrentía (AYALA MARTÍNEZ & VARGAS PÉREZ, 2014).

Escorrentía superficial o directo: Es la precipitación que no se infiltra en ningún momento y llega a la red de drenaje, moviéndose sobre la superficie del terreno por la acción de la gravedad. Corresponde a la precipitación que no queda tampoco detenida en las depresiones del suelo y que escapa a los fenómenos de evapotranspiración.

En las figuras 2 y 3 se hace una muestra del comportamiento de las precipitaciones dependiendo del tipo de techo.

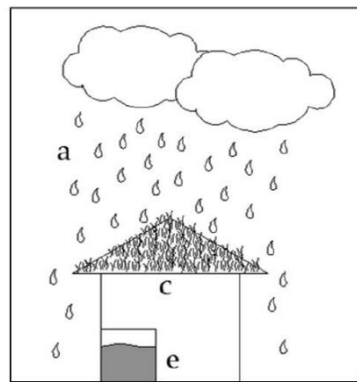
En la figura 2 se muestra un techo convencional (b), en donde se presenta una precipitación (a) que origina alta cantidad de escorrentía que es dirigida a los desagües, los cuales conducen a la red de alcantarillado pluvial a lo que la red colapsa, puesto que las tuberías no drenan lo suficientemente bien el agua y se presentan las inundaciones (Villegas González & Contreras Bejarano, 2019).



*Figura 2. Presencia de lluvia en cubiertas convencionales*

Fuente: Green roofs for comprehensive water management: case study in Chapinero, Colombia (Villegas González & Contreras Bejarano, 2019).

En la figura 3 se muestra una cubierta verde (c) en donde se presenta una precipitación, la cual se infiltra en el techo verde lo que hace que se reduzca el volumen de escurrimiento para así mitigar la capacidad de agua en las tuberías de las redes de alcantarillado; el agua infiltrada en el techo es almacenada en un recurso hídrico (e) dentro de la edificación (Villegas González & Contreras Bejarano, 2019).



*Figura 3. Presencia de lluvia en cubiertas verdes*

Fuente: Green roofs for comprehensive water management: case study in Chapinero, Colombia (Villegas González & Contreras Bejarano, 2019).

### **3.8 Evapotranspiración**

Es un proceso que ocurre por medio de las plantas, éstas absorben cierta cantidad de agua que cae de las precipitaciones y la expulsan por medio de evaporación y transpiración, haciendo que esta agua vuelva a la atmósfera en fase gaseosa (Hernández Bolívar & Cucaita Melgarejo, 2020).

### **3.9 Cuenca**

Las particularidades físicas de una cuenca forman un agregado que influye profundamente en el comportamiento hidrológico de una zona de estudio ya que a partir de las características de una cuenca se puede lograr transferir la información de esta a una semejanza geomorfológicamente y

climática de la zona de estudio esto debido a que puede haber carencia de registros hidrológicos en la zona de estudio (AYALA MARTÍNEZ & VARGAS PÉREZ, 2014).

### **3.10 Drenajes urbanos**

El incremento urbano implica que se tenga que emplear transformaciones y remplazos de la superficie natural esto debido a la construcción de diversas edificaciones o vías lo que implique el recurso suelo , esto genera en grandes áreas el incremento del agua lluvia convertida en escorrentía lo que implica una gran reducción de la infiltración con el desarrollo de las infraestructuras se ve notable la implementación de drenajes que han garantizado apropiadas condiciones de vida para una población y el riesgo en los cuerpos de agua donde los sistemas descargan (Rodríguez Molano, 2016).

### **3.11 Sistemas urbanos de drenaje sostenible**

Son elementos participantes en el drenaje de las ciudades que evitan el riesgo de inundaciones, pero además tiene una función principal que es la gestión de las aguas el impedir la contaminación de las mismas muchos de los SUDS son infraestructuras verdes que tienen la particularidad del empleo de vegetación como elemento de control y regulación de la lluvia (Rodríguez Molano, 2016).

### **3.12 Técnicas de desarrollo de bajo impacto (LID)**

Las técnicas de desarrollo de bajo impacto o conocidas como Low Impact Development (LID) son estrategias de diseño que tienen el objetivo de mantener en forma natural el recurso hídrico previo al desarrollo de la población mediante técnicas de diseño que crean un paisaje hidrológico equivalente al natural. Con la finalidad de conservar las características del agua subterránea, la infiltración y almacenamiento, así como el control del volumen y la frecuencia de las descargas a través de la retención y detención de aguas pluviales distribuida a una micro escala integrada, la

reducción de las superficies impermeables y el alargamiento de las trayectorias del flujo y el tiempo de escorrentía (Hernández Bolívar & Cucaita Melgarejo, 2020).

### **3.13 GIFMOD**

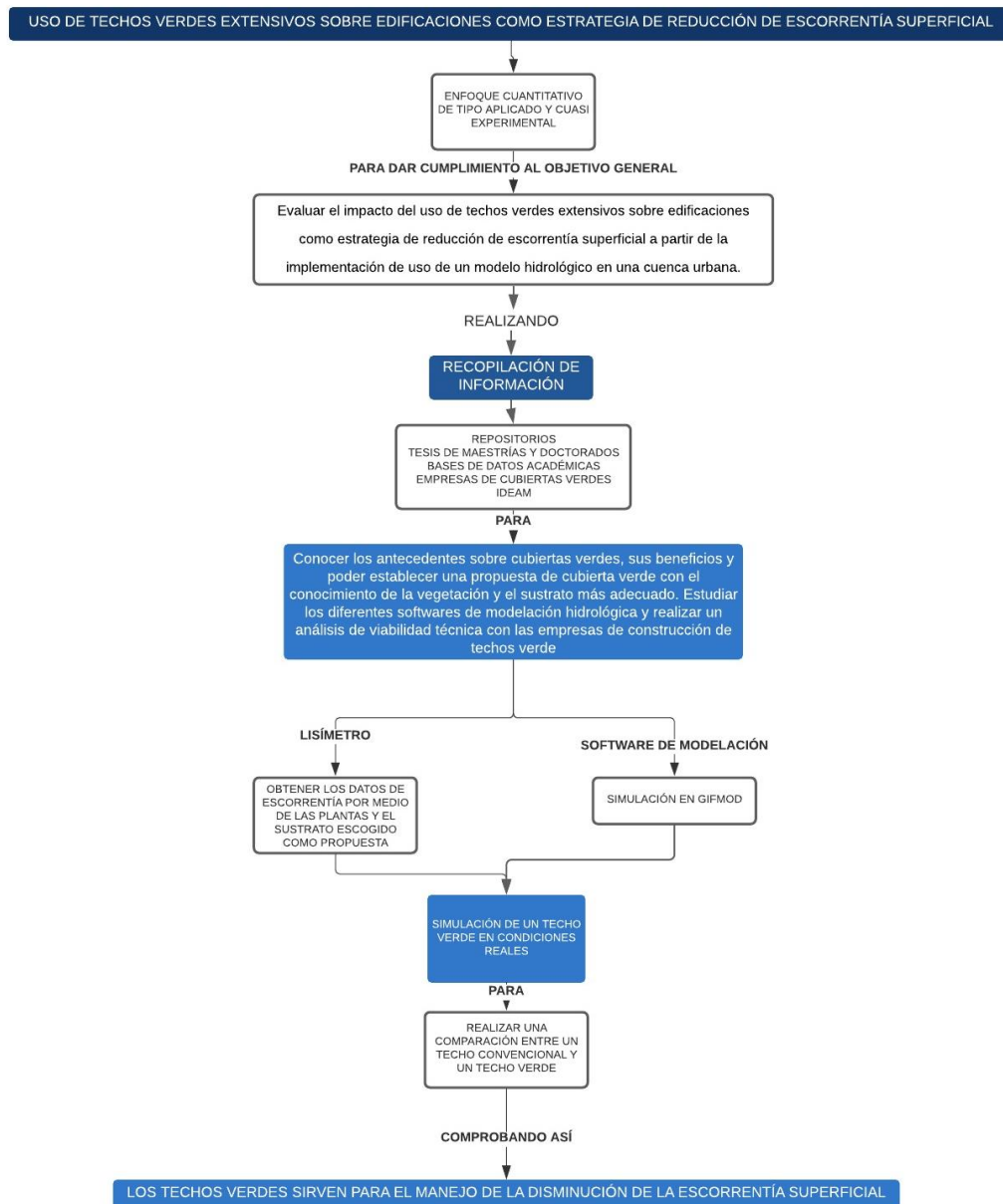
Green Infrastructure Flexible Model, es un software que se utiliza para construir simulaciones o modelaciones evaluando el comportamiento de las infraestructuras verdes con respecto a la gestión de aguas lluvias (GI: Green infrastructure), prácticas urbanas y agrícolas (BMP: Best management practices) (MASSOUDIEH & AFLAKI, 2017).

Cuando se habla sobre la gestión de aguas en GifMOD, se refiere a que abarca desde escorrentía superficial hasta aguas subterráneas; incluye también el sistema hidráulico, transporte de partículas y transporte de los componentes del agua (MASSOUDIEH & AFLAKI, 2017).

Los modelos se construyen por medio de bloques que simbolizan los estanques de agua superficiales, arroyos, flujos terrestres, suelos saturados y no saturados y tipo de plantas que se van a sembrar, conectándose por medio de tuberías o interfaces naturales u otras opciones (MASSOUDIEH & AFLAKI, 2017).

## 4. Metodología

La presente investigación se realizó con el enfoque cuantitativo, de tipo cuasiexperimental y descriptivo. Esta etapa consiste en la identificación de cada una de las variables importantes para el presente estudio, por lo cual se determina una ruta lógica de secuencia. La descripción de cada uno de los requerimientos está resumida en el mapa conceptual de la figura 4 que se presenta a continuación.



*Figura 4. Uso de techos verdes extensivos sobre edificaciones como estrategia de reducción de escorrentía superficial*

Fuente: elaboración propia.

Se parte de la necesidad de conocer a profundidad el concepto de techos verdes con la finalidad de determinar las variables a manejar y conocer los datos locales que se necesitan para dicha actividad. Se iniciará con el conocimiento de edificaciones con techos verdes, así como la precipitación que cae sobre el área de estudio. Para esto se procederá a investigar las estaciones pluviométricas activas en el sector de estudio para conocer los datos históricos de lluvia, también como información adicional se tendrá en cuenta los estudios realizados por algunos investigadores realizados previamente en el lugar. Se tuvo en cuenta el desarrollo de cada objetivo específico planteado.

#### **4.1 Datos históricos de lluvia**

Se obtuvo información de los datos históricos de lluvia del IDEAM y del proyecto de grado de Carlos Arturo Cucaita y Juan Sebastián Hernández.

No fue posible la obtención de datos de la estación meteorológica de la Universidad Pontificia Bolivariana por motivos de la contingencia sanitaria que el país está atravesando en este tiempo.

Para la ejecución del primer objetivo “determinar el tipo de sustrato y vegetación presente en un techo verde extensivo por medio de revisión bibliográfica y realizando un lisímetro para hallar la evapotranspiración y la infiltración experimental en el tipo de vegetación” se presenta el ítem 6.2, el cual contiene la investigación del sustrato y vegetación, la realización del lisímetro y del pluviómetro.

## **4.2 Determinar el tipo de sustrato y vegetación de un techo verde extensivo**

### **4.2.1 Sustrato**

El sustrato para plantas es un elemento sólido y poroso que funciona como amarre para las raíces de las plantas, aportando nutrientes, agua y oxígeno. Dependiendo del sistema de cultivo, es necesario su tipo de sustrato incluyendo las propiedades físicas y químicas que puedan aportar cada componente, así como también el recipiente, el clima, el mantenimiento y la vegetación (BASRBARO, SOTO, SISARO, KARLANIAN, & STANCANELLI, 2017).

Las primordiales propiedades físicas que debe tener un sustrato para plantas es la densidad, porosidad y aireación; y las primordiales propiedades químicas, las cuales son las encargadas de la calidad del material son, el pH y la conductividad eléctrica (BASRBARO, SOTO, SISARO, KARLANIAN, & STANCANELLI, 2017).

Se aconseja utilizar materiales inorgánicos hasta un 80% como lo son Piedra pómez, zeolita, vermiculita y perlita y un 20% para los materiales orgánicos como la turba o compost. El porcentaje de materiales inorgánicos es mayor ya que permite que tenga un drenaje adecuado y la profundidad no cambie y pueda mantenerse duradero (SOTO, BARBARO, COVIELLA, & STANCANELLI).

Se usa como materia orgánica la turba, compost, cascarilla de arroz y escoria; y como materia inorgánica se usa arena sílice, zeolita, caolín, piedra pómez, carbón activado y carbón vegetal. Se recomienda una mezcla de sustrato de 30% de materia orgánica y 70% de materia inorgánica. Estos porcentajes, tienen como objeto el disminuir la cantidad de sólidos totales y la turbiedad; garantizando así con componentes como la zeolita o la piedra pómez, una mayor capacidad de retención hídrica. Una buena mezcla y una buena implementación de un sustrato es muy importante ya que si no es así puede afectar la calidad del agua que desliza y convirtiéndose así de

mayor calidad la escorrentía de un techo convencional (TRUJILLO TRUJILLO, DESARROLLO DE SUSTRATOS PARA CUBIERTAS VERDES EN EL ÁREA DE BOGOTÁ, 2016).

Para un proyecto de grado sobre el comportamiento de sustrato en techos verdes y azules, utilizaron una mezcla de humus de lombriz de marca Confiabonos, la cual tiene una composición garantizada y cumple con la norma de metales pesados para la agricultura orgánica (VÁSQUEZ LUNA, 2013).

Uno de los requerimientos importantes para un sustrato de techos verdes extensivos es la alta permeabilidad, el bajo peso, una estructura duradera y una mínima compactibilidad; por tanto, el sustrato debe contener un bajo contenido de materia orgánica ya que su descomposición es muy rápida y disminuye el volumen influyendo en el drenaje. Generalmente en los casos de cubiertas verdes extensivas, el sustrato no debe superar el 20% de materia orgánica (LÓPEZ LÓPEZ, CALAZA MARTÍNEZ, PÁEZ ALBORÉS, & LÓPEZ FABAL).

El sustrato para un techo verde extensivo debe ser liviano y abarcar los nutrientes y minerales que necesitan las plantas para mantenerlas con vida, siendo así, existe una publicación de la FLL “Lineamientos para el planeamiento, ejecución y mantenimiento de techos verdes” donde nos muestra una pequeña matriz de las propiedades físicas y químicas que debe tener un techo verde (GRIMOLDI, 2009).

Para las propiedades físicas dice que debe tener una retención de agua  $\geq$  al 25% y la máxima capacidad de retención de agua  $\geq$  al 35%, un contenido de aire en el momento que el agua esté siendo retenida  $\geq$  al 10%, una permeabilidad  $\geq$  al 60 (mm/min) y una densidad que esté en un rango de 0.8 – 1.4 ( $g/cm^3$ ) (GRIMOLDI, 2009).

Para las propiedades químicas dice que debe tener un pH que varía en un rango de 6.5 – 8, contenido de Nitrógeno  $\leq 80$  (mg/l), contenido de Fósforo  $\leq 200$  (mg/l), contenido de Potasio  $\geq 700$  (mg/l) y contenido de Magnesio  $\leq 160$  (mg/l) (GRIMOLDI, 2009).

Con la recopilación de información obtenida se procede a realizar la figura 5 en donde presenta el número de veces encontrada el material de materia inorgánica.

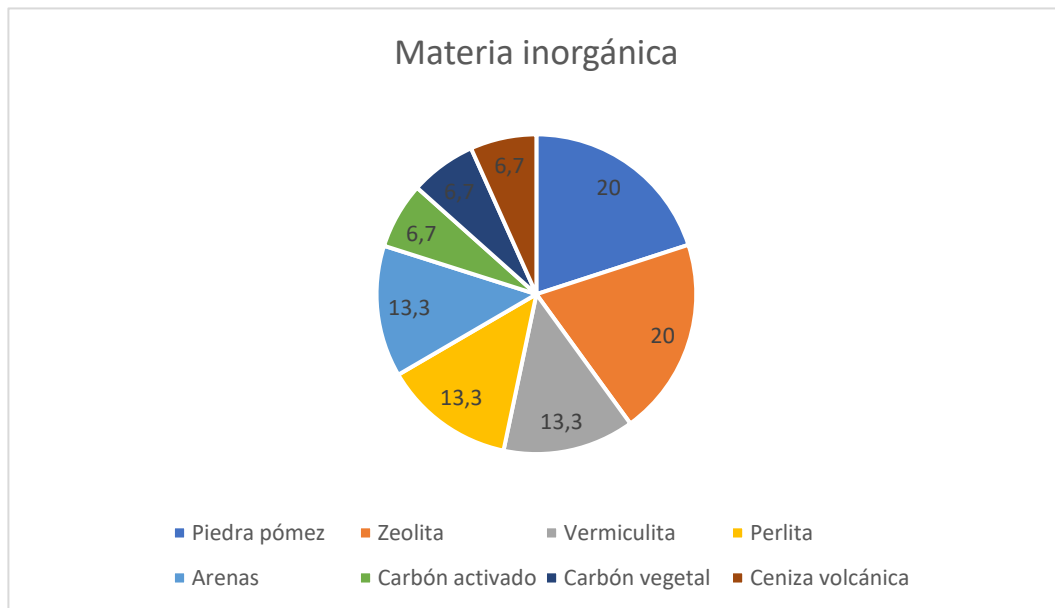


Figura 5. Contenido de materia inorgánica

Fuente: elaboración propia.

La piedra pómez es una piedra volcánica que se forma cuando el magma entra en contacto con la atmósfera provocando la evaporación del agua en su interior, transformándose en un elemento poroso y de poca densidad (BASRBARO, SOTO, SISARO, KARLANIAN, & STANCANELLI, 2017).

La perlita procede de las rocas volcánicas vítreas que se forman por enfriarse rápidamente. La perlita puede actuar en un sustrato como un elemento de aireación (BASRBARO, SOTO, SISARO, KARLANIAN, & STANCANELLI, 2017).

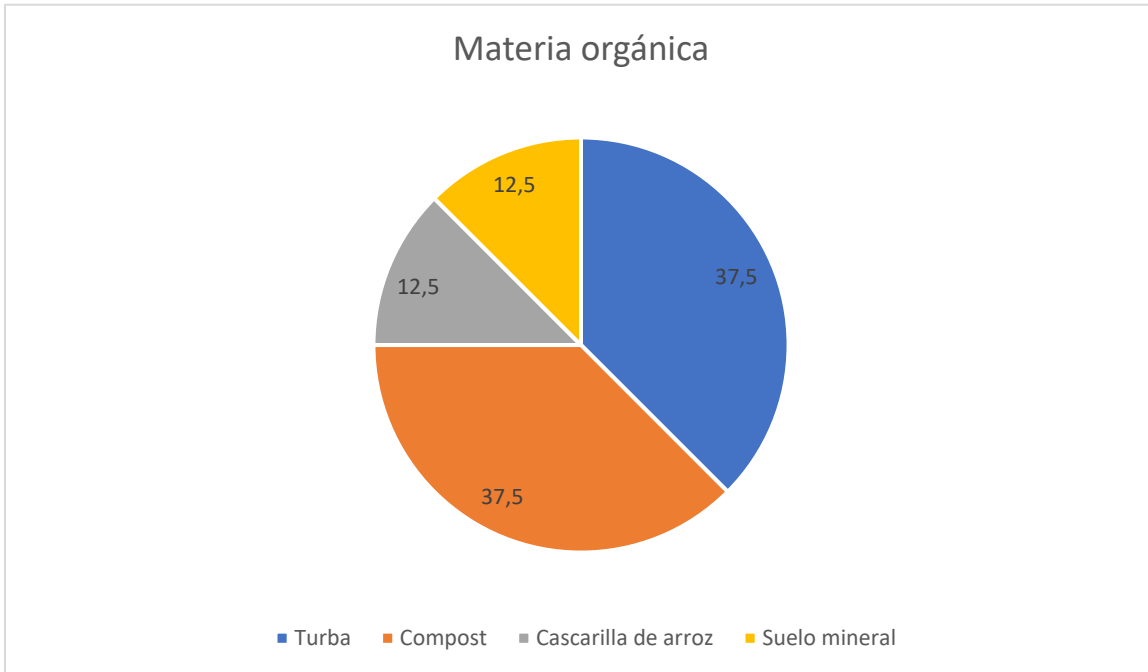
La vermiculita es un mineral que presenta una estructura trilaminar y presenta moléculas de agua entre sus láminas; para que este material se convierta en un componente poroso, debe pasar por unos hornos a temperaturas muy elevadas (1000°C) en un bajo tiempo, generando así la evaporación del agua, expandiendo las láminas hasta 20 veces (BASRBARO, SOTO, SISARO, KARLANIAN, & STANCANELLI, 2017).

La zeolita es un mineral que sobresale por tener una elevada capacidad de retención de agua e intercambio catiónico (BASRBARO, SOTO, SISARO, KARLANIAN, & STANCANELLI, 2017).

Turba se le denomina la vegetación que está descompuesta por abundancia de agua y escasez de oxígeno (BASRBARO, SOTO, SISARO, KARLANIAN, & STANCANELLI, 2017).

El compost es originado por la descomposición aeróbica de residuos orgánicos; se elabora con diferentes componentes algunos agrícolas, ganaderos, industriales, etc. (BASRBARO, SOTO, SISARO, KARLANIAN, & STANCANELLI, 2017).

Con la recopilación de información obtenida se procede a realizar la figura 6 en donde presenta el número de veces encontrada el material de materia orgánica.



*Figura 6. Contenido de materia orgánica*

Fuente: elaboración propia.

Según en el libro de sustratos para techos verdes sustentables (extensivos) (BASRBARO, SOTO, SISARO, KARLANIAN, & STANCANELLI, 2017), se realizó la figura 7, la cual muestra los factores que se tuvieron en cuenta para determinar el tipo de sustrato para techos verdes extensivos; otro factor que se tuvo en cuenta fue la asequibilidad de los componentes en la ciudad de Bucaramanga y/o su área metropolitana.

MATERIA ORGÁNICA							
COMPONENTE	% DE VECES REPETIDAS	ASEQUIBLE	PROPIEDADES FÍSICAS			PROPIEDADES QUÍMICAS	
			DENSIDAD (Kg.m-3)	% CAPACIDAD DE AIREACIÓN	% RETENCIÓN DE AGUA	pH	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (dS.cm2)
TURBA	37,5%	SÍ	110	44	49	3,5	0,6
COMPOST	37,5%	SÍ	117	57	32	4,5	0,3
MATERIA INORGÁNICA							
PIEDRA PÓMEZ	20,0%	NO	290	69	18	7,2	0,05
ZEOLITA	20,0%	NO	720	42	31	8,4	2,6
VERMICULITA	13,3%	SÍ	140	46	48	6,2	0,02
PERLITA	13,3%	SÍ	90	69	27	6,1	0,01
ARENAS	13,3%	SÍ	970	2	33	5,7	0,04

Figura 7. Factores para determinar el tipo de sustrato en un techo verde extensivo

Fuente: elaboración propia.

Se analizarán dos tipos de sustratos diferentes para poder observar el comportamiento de las plantas en el lisímetro y poder determinar el sustrato para techos verdes extensivos. Con la figura 7, contemplando las diferentes propiedades de cada sustrato se propusieron las siguientes combinaciones de sustrato para el lisímetro que se muestran en la figura 8.

SUSTRATO				
NÚMERO	CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA		CONTENIDO DE MATERIA INORGÁNICA	
	PORCENTAJE	COMPONENTE	PORCENTAJE	COMPONENTE
# 1	20%	TURBA	80%	PERLITA
#2	30%	COMPOST	70%	VERMICULITA

Figura 8. Sustrato seleccionado

Fuente: elaboración propia.

Para el sustrato #1 se escogió como contenido de materia orgánica la turba y como contenido de materia inorgánica la perlita, siendo 20% - 80% respectivamente.

La turba es la descomposición de residuos vegetales que sirve de abono para que las plantas tengan mejor absorción de nutrientes y absorción de agua (BAQUERA CUADROS & TAUSA GARCÍA, 2018).

La perlita es una roca volcánica silicia y funciona como buen aligerante para el suelo, el cual provee aireación y drenaje (PRODUCCIÓN DE SUSTRATOS PARA VIVEROS, 2002).

Para el sustrato #2 se escogió como contenido de materia orgánica el compost y como contenido de materia inorgánica la vermiculita, siendo 30% - 70% respectivamente.

El compost está compuesto por varios componentes como lo son la gallinaza, bagazo, yeso, cal, agua y tierra; sirve para que las plantas crezcan saludables, ahorra el 3% más de agua y lo más importante puede tolerar sequías (MARÍN, 2013).

La vermiculita es un mineral compuesto por placas con una gran amplitud de absorción de nutrientes y de agua y contiene una excelente aireación (MARÍN, 2013).

#### **4.2.2 Vegetación**

Un techo verde no está compuesto de una sola especie de planta o vegetación, lo conforman varios tipos de especies y es la capa viva del techo verde; por lo tanto, lo más importante es proporcionarle todas las condiciones óptimas para mantener viva e intacta su estructura (ESCALANTE, 2011).

Existen varios tipos de plantas que se pueden utilizar para los techos verdes extensivos, en la mayoría de libros nos dicen que las más apropiadas son el tipo Sedum, pero no sólo se puede implementar esa especie, también podemos implementar las arbustivas, herbáceas, xenófitas, entre otras.

El mantenimiento de los techos verdes extensivos requiere de un mantenimiento muy bajo y como su espesor de sustrato es mínimo, sus plantas deben ser más resistentes y deben ser especies

herbáceas, musgos o tipo sedum (LÓPEZ LÓPEZ, CALAZA MARTÍNEZ, PÁEZ ALBORÉS, & LÓPEZ FABAL).

Para determinar la vegetación que se utilizará, se realizará una recopilación de todas las plantas que están sembradas en techos verdes en el área metropolitana de Bucaramanga y que puedan servir para el objetivo principal que es el manejo de la escorrentía superficial.

Se comienza con un techo verde extensivo de URBANAS SAS, ubicado en Cabecera, el cual tiene un área de  $127\text{ m}^2$  con un espesor de sustrato entre los 10 – 15 cm, contiene algunas plantas tipo sedum y también contiene Duranta, Verde limón y Té (QUINTERO FERNÁNDEZ & VALCARCEL CHAPARRO, 2020).

El segundo proyecto es un techo verde en el edificio Ventus ubicado en Floridablanca, en donde se encontraron 5 especies Ixora, Bucida Buceras, Juniperus horizontails, Axonopues compressus y Tradescantia Spathacea (QUINTERO FERNÁNDEZ & VALCARCEL CHAPARRO, 2020).

El tercer proyecto es un techo verde en el edificio Gaia ubicado en Floridablanca, en donde se encontraron 14 especies de plantas, Ixora, Opuntia ficus-indica, Aloe vera, Agave, Curpressus macrocarpa, Thuja orientalis, Juniperus horizaontalis, Myrtus communis, Asparagus Densiflorus, Brucida buceras, Axonopus compressus, Euphoria mili, Chlorophytum comosum y Buganvillea spectabilis willd (QUINTERO FERNÁNDEZ & VALCARCEL CHAPARRO, 2020).

El cuarto proyecto es un techo verde en el conjunto residencial Casa Bosque ubicado en Floridablanca, en donde se encontraron 10 especies de plantas Zoysia japonica, Axonopus compressus, Monstera deliciosa, Ruellia brittoniana, Tradescantia spathacea variegata, Dypsis lutescens, Heliconia bihai, Alternanthera ficoidea, Euonymus japunicus y Dracaena (QUINTERO FERNÁNDEZ & VALCARCEL CHAPARRO, 2020).

Se deben tener en cuenta 3 factores primordiales al momento de la selección de las plantas para un techo verde, el primero es el tipo de techo verde y su objetivo, en el caso de este proyecto es el de gestión de escorrentía; el segundo factor son las condiciones climáticas que sería la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana; y el tercer factor es la biota local (ESCALANTE, 2011).

Para el objetivo principal que es el manejo de escorrentía superficial, se necesitan plantas que tengan un riego medio, una demanda hídrica entre media y alta y un mantenimiento bajo (QUINTERO FERNÁNDEZ & VALCARCEL CHAPARRO, 2020). Teniendo en cuenta el proyecto de grado Impacto medioambiental del uso de techos y muros verdes sobre edificios en la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana, se seleccionaron 4 especies como propuesta para realizar el lisímetro, las plantas que cumplen con los requisitos: *Ixora*, *Chlorophytum comosum*, *Duranta erecta* y *Camellia sinensis*; como se muestra en la siguiente figura 9.

VEGETACIÓN				
IMAGEN				
NOMBRE COMÚN	DURANTA GOLD	PLANTA DE TÉ	MALAMADRE	CRUZ DE MALTA
NOMBRE CIENTÍFICO	DURANTA ERECTA	CAMELLIA SINENSIS	CHLOROPHYTUM COMOSUM	IXORA
FAMILIA	VERBENACEAE	THEACEAE	AGAVACEAE	RUBIACEAE
ESPECIE	ARBUSTIVA	ARBUSTIVA	HERBÁCEA	ARBUSTIVA
TIEMPO DE RIEGO	2 - 3 VECES SEMANALES	2 SEMANAL	1 SEMANAL	2 SEMANAL
ORIGEN	MADAGASCAR	CHINA - SUDESTE ASIÁTICO	ÁFRICA - SUDÁFRICA - ASIA - AUSTRIA	INDIA - MALASIA- CHINA - SRI LANKA
REQUERIMIENTO HÍDRICO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	MEDIO
SOL - SOMBRA - SEMI SOMBRA	SOL - SEMI SOMBRA	SEMI SOMBRA	SEMI SOMBRA	SEMI SOMBRA
PLAGAS Y ENFERMEDADES	Atrae la mosca blanca, ácaros, pulgones y cochinillas.	Presencia de pequeños insectos oscuros o blancos, manchas redondeadas e irregulares sobre las hojas, caídas de yemas y oscurecimiento de los pétalos.	Arañas rojas, manchas blancas como motas en las hojas, ácaros.	Hojas marchitas, cochinillas y pulgones.

Figura 9. Vegetación seleccionada

Fuente: elaboración propia

Especie #1 *Duranta erecta*: es una especie que fue encontrada en un techo verde en la ciudad de Bucaramanga en una obra llamada “La Cabecera” de la constructora URBANAS SAS; es una especie arbustiva la cual su requerimiento hídrico es medio, necesita de 2 – 3 veces de riego semanal y requiere sol o semisombra.

Especie #2 *Camellia sinensis*: más conocida como la planta de té, es una especie arbustiva, su requerimiento hídrico es medio, la frecuencia de riego es de 2 veces por semana y necesita semisombra.

Especie #3 *Chlorophytum comosum*, es conocida como Malamadre, es una planta herbácea, de todas las plantas escogidas es la que menos tiempo de riego requiere, ya que es 1 vez semanal, su necesidad hídrica es media y necesita de semisombra; fue una de las especies más encontrada en los techos y muros verdes de la ciudad de Bucaramanga.

Especie #4 *Ixora*, es una planta arbustiva que tiene un requerimiento hídrico medio, su frecuencia de riego es de 2 veces por semana y necesita de semi sombra; fue una de las especies más encontrada en los techos y muros verdes de la ciudad de Bucaramanga.

### **4.3 Ensayos experimentales**

#### **4.3.1 Lisímetro**

El primer objetivo específico es determinar el tipo de sustrato y de las especies de flora presentes en algunos de los techos verdes en la ciudad de Bucaramanga esto con la finalidad de conocer sus características como infiltración y evapotranspiración, para esto se llevó acabo un lisímetro detallado de cada una de las especies estudiadas mencionadas en la figura 9.

En cada uno de los ensayos realizados se tomaron datos volumétricos para determinar la infiltración diaria y así calcular la evapotranspiración de cada una de las especies; para esta etapa

se tomó un riego de 0,058 litros por día teniendo en cuenta que la precipitación promedio anual de Bucaramanga es de 1159 mm/año y a partir del área de siembra de las materas de nuestro ensayo se determinó el riego de cultivo para cada planta y se consideró tomar esta precipitación debido a que las cubiertas verdes extensivas son de un riego promedio y su instalación es a condiciones de campo abierto.

Se toman los datos diarios de infiltración para determinar la evapotranspiración final como se presentan en las tablas de los anexos B, C, D y E.

#### **4.3.1.1. Cantidad de sustrato**

Peso de la matera = 90 g

Peso del sustrato + matera = 1230 g

Peso del sustrato = 1230 g – 90 g = 1140 g

Para hallar la cantidad de sustratos según los porcentajes de la figura 8 del capítulo 7 de este libro se realizaron las siguientes reglas de tres:

##### ***Perlita***

$$100 \% \rightarrow 1140 \text{ g}$$

$$80 \% \rightarrow X$$

$$X = 912 \text{ g}$$

Como se necesitan para 4 plantas los 912g se multiplican por 4 y se obtiene una cantidad de 3648g; este dato lo necesitamos para saber la cantidad de perlita que es necesario comprar.

##### ***Vermiculita***

$$100 \% \rightarrow 1140 \text{ g}$$

$$70 \% \rightarrow X$$

$$X = 798 \text{ g}$$

Como se necesitan para 4 plantas los 798g se multiplican por 4 y se obtiene una cantidad de 3192g; este dato lo necesitamos para saber la cantidad de vermiculita que es necesario comprar.

### ***Turba***

$$100 \% \rightarrow 1140 \text{ g}$$

$$20 \% \rightarrow X$$

$$X = 228 \text{ g}$$

Como se necesitan para 4 plantas los 228g se multiplican por 4 y se obtiene una cantidad de 912g, este dato lo necesitamos para saber la cantidad de turba que es necesario comprar.

### ***Compost***

$$100 \% \rightarrow 1140 \text{ g}$$

$$30 \% \rightarrow X$$

$$X = 342 \text{ g}$$

Como se necesitan para 4 plantas los 342g se multiplican por 4 y se obtiene una cantidad de 1368g, este dato lo necesitamos para saber la cantidad de compost que es necesario comprar.

#### **4.3.1.2. Adaptación de las plantas**

En cada una de las especies se determinó hacer una etapa de adaptación al nuevo sustrato ya que estas especies estaban sembradas en sustratos con altos contenidos de tierra negra y tamo de arroz, lo que nos indicaba que era un sustrato pesado y que no estaba dentro de los parámetros de investigación. En esta etapa se tomó cada una de las especies y se trasplantaron a cada uno de los sustratos con los porcentajes indicados y la humedad determinada; para este procedimiento se tomó la especie y se lavaron sus raíces con suficiente agua, esto con el fin de garantizar que cada una de las raíces quedara libre del anterior sustrato para la siembra en el sustrato de investigación como

se muestra en las siguientes imágenes. En la figura 10 se observa el proceso de adaptación al nuevo sustrato.



*Figura 10. Adaptación de las especies al nuevo sustrato*

Fuente: elaboración propia.

#### **4.3.1.3. Pluviómetro**

Para comprender mejor el ensayo del lisímetro y no dejar ninguna variable sin evaluar se desarrolló la idea de hacer un pluviómetro casero, como se muestra en la figura 11; esto con el fin de comparar y tener los datos de precipitación del lugar donde se realizaron los ensayos, esto debido a que por problemas de salud pública del país no se tenían los datos de precipitación diaria y el suministro de esta información por medio de plataformas digitales duraba cerca de 2 meses por lo que se decidió hacer el pluviómetro como se muestra en la imagen.



*Figura 11. Pluviómetro experimental*

Fuente: elaboración propia

Este pluviómetro cuenta con una forma cilíndrica que protege a la probeta milimetrada que está en su interior, cuenta con un embudo para recoger la cantidad de precipitación caída en el lugar; para la calibración de este pluviómetro se solicita al instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales (IDEAM) los datos de la estación más cercana al sitio de estudio, estos datos se evalúan para los días de calibración que fueron tres días en los cuales el pluviómetro recolectó 180 ml de agua, los datos de la estación más cercana que es la estación La Granja – Piedecuesta, para estos tres días de calibración la precipitación diaria acumulada es de 5,7mm/día, para calcular y determinar la calibración del pluviómetro se determina el área de la probeta para conocer los milímetros con referencia a la estación como se presenta a continuación:

Área de la probeta

$$A = \pi r^2$$

$$A = \text{area}$$

$$\pi = \text{pi} \qquad \pi = 3,141516$$

$$r = \text{radio} \qquad r = 0,0325 \text{ m}^2$$

$$A = \pi r^2$$

$$A = 0,0033m^2$$

Con el valor del área de la probeta se multiplica por la precipitación de la estación teniendo en cuenta que un milímetro de lluvia es el espacio ocupado por un litro de agua en un metro cuadrado.

A continuación, se presenta los datos de precipitación diaria:

*Tabla 1. Precipitaciones diarias*

<b>Id Parámetro</b>	<b>Etiqueta</b>	<b>Descripción Serie</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Fecha</b>	<b>Valor</b>
<b>Precipitación</b>	PTPM_CON	DÃa pluviomÃ©trico	Diaria	1/10/2020 0:00	4,5
<b>Precipitación</b>	PTPM_CON	DÃa pluviomÃ©trico	Diaria	2/10/2020 0:00	3,7
<b>Precipitación</b>	PTPM_CON	DÃa pluviomÃ©trico	Diaria	4/10/2020 0:00	4,1
<b>Precipitación</b>	PTPM_CON	DÃa pluviomÃ©trico	Diaria	5/10/2020 0:00	1,1
<b>Precipitación</b>	PTPM_CON	DÃa pluviomÃ©trico	Diaria	6/10/2020 0:00	0,5
<b>Precipitación</b>	PTPM_CON	DÃa pluviomÃ©trico	Diaria	7/10/2020 0:00	0,6
<b>Precipitación</b>	PTPM_CON	DÃa pluviomÃ©trico	Diaria	8/10/2020 0:00	2
<b>Precipitación</b>	PTPM_CON	DÃa pluviomÃ©trico	Diaria	9/10/2020 0:00	0

Fuente: IDEAM

Los días de calibración fueron del 4 al 6 de octubre para una precipitación de 5,7 mm/día.

Este dato se multiplica por el área de la probeta y corroborar la calibración:

$$\text{Calibración} = 5,7 \text{ mm/día} \times 0,0033m^2 = 0,01881 \text{ mm/día}$$

Se puede notar que la calibración del pluviómetro es adecuada y coincide con los datos de la estación, lo que sirve para captar la precipitación de los días del ensayo del lisímetro; teniendo en cuenta que el pluviómetro experimental se realizó porque la estación se encuentra a 3 km de distancia del lugar de donde se hizo el lisímetro experimental.

En la siguiente tabla 2 se muestra la relación entre la estación LA GRANJA y el pluviómetro experimental con la intensidad en (mm/día).

*Tabla 2 Intensidad de lluvia en mm/día – relación entre la estación pluviométrica y el pluviómetro experimental*

INTENSIDAD DE LLUVIA (mm/día)	
ESTACIÓN LA GRANJA	PLUVIÓMETRO EXPERIMENTAL
0,6	0,58119
2	1,96238
0	0
0,4	0,38119
1,4	1,36238
0,4	0,38119
0,4	0,38119
0	0
0	0
0	0
5	4,98119
2,1	2,04357
0,9	0,88119
0	0
3,9	3,88119

Fuente: IDEAM - Propia

#### **4.3.2 Ensayos de evapotranspiración a partir del lisímetro**

Para la elaboración del lisímetro se compraron 8 plantas que fueron seleccionadas en la figura 9 de este capítulo, 2 de cada especie; siendo cada una colocada en un tipo de sustrato escogido en la figura 8 de este capítulo, para así observar el comportamiento de las plantas con cada sustrato y escoger el más óptimo para los techos verdes extensivos.

Para esta etapa se toma un riego de 0.058 litros por día basados en investigación de la precipitación media anual de la ciudad de Bucaramanga, esto debido a que las cubiertas verdes están en constante variación del clima teniendo en cuenta el factor del clima local.

La precipitación media anual de la ciudad de Bucaramanga es de 1159 mm/año con este dato lo multiplicamos por el área de la materia de riego y se obtiene el riego de cultivo que sería 0,058 litros por día; se toman datos de infiltración y pesos para determinar el valor de la evapotranspiración como se presenta en las tablas de los anexos B, C, D y E.

El lisímetro se realizó en un lapso de tiempo de 15 días que comprenden entre el 7 de octubre de 2020 hasta el 21 de octubre de 2020.

Para la realización del lisímetro se tuvieron en cuenta la hora en que se pesaba el suelo + planta y la hora de riego, el peso del suelo + planta, la cantidad de riego, el peso del suelo + planta + agua y si en el día hubo precipitación, también se tienen en cuenta la temperatura, la humedad y el viento de cada día del lisímetro y estos datos son arrojados por el celular; para el cálculo de la infiltración, como no se tenía una probeta que pudiera darme el resultado exacto, se pesaba el agua y teníamos en cuenta que 1 L equivale a 1 Kg. Para el cálculo de la evapotranspiración lo presento a continuación:

$$E_{to} = \text{Cantidad de agua} + \text{precipitación} - \text{infiltración} - (\text{Peso (suelo+planta+agua)} - \text{Peso (suelo+planta)})$$

Para el segundo objetivo “aplicar los datos en un modelo hidrológico que establezca la relación entre flora/sustrato usando una herramienta que considere la dinámica del agua en una cubierta verde” se presenta a continuación en el ítem 6.3 en donde se muestra una matriz comparativa y la descripción de cada uno de los softwares investigados.

#### **4.4 Determinar el software de modelación**

En el momento de escoger el programa de modelación que me sirva para el objetivo número 2 de mi proyecto de grado, he realizado una matriz en donde muestro 4 programas de modelación

hidrológica en infraestructura verde con las características que se supone debe tener para la realización de dicho objetivo, como se muestra en la tabla 3.

*Tabla 3. Matriz comparativa de programas de modelación hidrológica*

MATRIZ DE PROGRAMAS DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA						
CARACTERÍSTICA		HYDRUS	WBM	GIFMOD	SWMM	
Aplicaciones	Adquisición gratuita	x		x	x	
	Código abierto	x	x	x	x	
	Modelado de gestión de escorrentía de aguas urbanas.	x	x	x	x	
	Modelado de gestión de escorrentía de aguas agrícolas.	x		x		
	Modelos conceptuales de Infraestructura verde.	x	x	x		
	Modelo de simulación de técnicas de drenaje sostenible.					x
	Modelado de transporte de contaminantes.	x		x		x
	Modelado del rendimiento hidráulico.			x		x
	Calidad de agua.	x	x	x		x
	Cantidad de agua.			x	x	x
	Modelado de bloques completamente secos.				x	
	Modelado del movimiento del agua de precipitación.				x	x
	Introducir nuevas ecuaciones.				x	
	Enfoque numérico para reducir la velocidad computacional.				x	
	Probar hipótesis y evaluar cómo pueden afectar diferentes procesos al rendimiento de las infraestructuras verdes.				x	
Diseño y dimensionamiento de una red de drenaje.	x				x	

		Diseño y dimensionamiento de estructuras de retención de aguas.	x			x
		Identificación de potenciales zonas de inundación urbana.	x			x
Infraestructura verde		Simulación de depósitos de lluvia.		x	x	
		Simulación de biorretención.	x		x	
		Simulación de cubiertas verdes.	x	x	x	x
		Simulación de técnicas de infiltración.		x		x
		Simulación de pavimentos permeables.		x	x	
		Simulación de cunetas verdes.			x	
Cantidad de escorrentía		Simulación de infiltración.	x	x		x
		Simulación de percolación	x		x	x
		Simulación de evapotranspiración.		x	x	x
		Simulación de flujos a través de tuberías y vertederos.	x		x	x
		Simulación de flujo superficial.		x	x	x
		Simulación de corrientes de agua.	x	x	x	x
Calidad de escorrentía		Simulación de intercambio de masas.	x		x	
		Simulación de transporte de partículas.	x		x	x
		Simulación de absorción de las plantas.		x	x	
		Simulación de acumulación de contaminantes superficiales.	x	x	x	x
<b>RESULTADO</b>			<b>19</b>	<b>14</b>	<b>27</b>	<b>22</b>

Fuente: elaboración propia.

La matriz se divide en 4 partes aplicaciones, infraestructura verde, cantidad de escorrentía y calidad de escorrentía. Dentro de las aplicaciones encontramos si el software es gratuito y de código abierto, el modelado de gestión de escorrentía de aguas agrícolas, modelos conceptuales de la infraestructura verde, simulación de técnicas de drenaje sostenible, transporte de contaminantes,

rendimiento hidráulico, calidad y cantidad del agua, modelo de bloques secos, modelado del movimiento de la precipitación, introducción de nuevas ecuaciones, entre otras; dentro de la infraestructura verde encontramos simulación de depósitos de lluvia, de biorretención, de cubiertas verdes, de técnicas de infiltración, pavimentos permeables y cunetas verdes; dentro de la cantidad de esorrentía encontramos la simulación de infiltración, percolación, evapotranspiración, simulación de flujos a través de tuberías y vertederos, flujo superficial y corrientes de agua; y finalmente, dentro de la calidad de esorrentía encontramos la simulación de intercambio de masas, transporte de partículas, absorción de plantas y acumulación de contaminantes superficiales.

El software que obtuvo mejor resultado es GIFMOD (Green infrastructure flexible model) con una calificación de 27, el cual es de adquisición gratuita, contiene aplicaciones como modelado de gestión de esorrentía de aguas urbanas; el cual es nuestro objetivo a realizar; también tiene para aguas agrícolas, puede modelar simulación de técnicas de drenaje sostenible, que para nuestro caso son las cubiertas verdes, se puede observar la calidad y cantidad de agua, también podemos realizar modelo de bloques secos, es decir, en un techo convencional; además tiene para simulación de infraestructura verde como simulación de depósitos de lluvia, biorretención, cubiertas verdes, técnicas de infiltración, pavimentos permeables y cunetas verdes; para la cantidad de esorrentía tiene simulación de infiltración, percolación, evapotranspiración, flujos a través de tuberías y vertederos, flujo superficial y corrientes de agua; y en el caso de calidad de esorrentía, realiza simulación de intercambio de masas, transporte de partículas, absorción de las plantas y acumulación de contaminantes superficiales.

El segundo software con mejor resultados es el SWMM (Stormwater management model) con 22 de calificación; este programa es uno de los programas más utilizados para simulación y modelado de infraestructura verde junto con el manejo de la esorrentía superficial; SWMM es un

programa más complejo y es utilizado para proyectos más grandes como planos de alcantarillado de cierta zona, también se puede simular un solo evento pluviométrico como un amplio periodo de tiempo continuo. A pesar que SWMM es un programa muy completo en cuanto al cálculo de escorrentía tiene unas pequeñas limitaciones como la inexistencia de vínculos GIS, presenta inestabilidad numérica y la velocidad de simulación es ligeramente lenta.

HYDRUS es un programa basado em Microsoft Windows para poder analizar el transporte de solutos em medios porosos saturados. El software incluye modelos computacionales em donde puede simular el movimiento bidimensional y tridimensional (HYDRUS 2D/3D) del agua, calor y solutos em medios saturados, además de eso se debe tener en cuenta que el único software gratuito de este paquete de modelos computacionales es HYDRUS 1D, el cual no contiene la mayoría de aplicaciones que son necesarias para la simulación de manejo de escorrentía superficial.

El programa con más baja calificación es WBM (Water Balance Model), WBM son una compilación de modelos diseñados para diversas aplicaciones en diferentes escalas espaciales. WBM simula desde el intercambio de agua entre el suelo y la atmósfera como el transporte de agua entre redes de escorrentía y arroyos; además muestra los componentes que se presentan espacial y temporalmente en el ciclo hidrológico y las variables de la calidad de agua. Aunque su última versión tenga excelentes mejoras, es un software de difícil asequibilidad y no presenta las aplicaciones realmente necesarias para resolver nuestro objetivo.

Los datos de vegetación con lo que ya viene incorporados el software GIFMod son sólo para cultivos agrícolas, por lo tanto, es necesario para el cálculo de la evapotranspiración realizar el modelo con una especie cuyo  $K_c$  sea parecido al  $K_c$  de la especie que utilizaremos para la propuesta de techo verde.

En el trabajo de Zamata (2019) se define  $K_c$  como el coeficiente de cultivo y es un parámetro para calcular la evapotranspiración real de un cultivo; esto quiere decir que el coeficiente de cultivo nos permite conocer las necesidades hídricas los cultivos sin necesidad de lisímetros.

$$K_c = \frac{ET_o}{ET_c}$$

$ET_o$  = Evapotranspiración de la ecuación Penman – Monteith.

$ET_c$  = Evapotranspiración calculada por medio de lisímetros.

De esta manera se obtuvo el  $K_c$  de la especie *Ixora*. La evapotranspiración de Penman – Monteith se sacó del proyecto de grado de Carlos Cucaita (Hernández Bolívar & Cucaita Melgarejo, 2020) el cual consiste en sacar un promedio con los datos de los mismos días de lisímetro y ese promedio se multiplica por el área de la matera, ya que, Penman – Monteith nos arroja datos para toda la zona; y el  $ET_c$  se obtuvo del promedio del lisímetro elaborado.

$$\text{Área matera} = \pi * r^2$$

$$A = \pi * (0,075)^2$$

$$A = 0,01767$$

$ET_o$  = Promedio de la evapotranspiración de 15 de Penman – Monteith multiplicado por el área de la matera.

$$ET_o = 4,15 * 0,01767 = 0,0733305$$

$ET_c$  = Promedio de la evapotranspiración de la especie *Ixora* en el lisímetro experimental realizado en este proyecto.

$$ET_c = 0,076562$$

Por tanto:

$$K_c = \frac{0,0733305}{0,076562}$$

$$Kc = 0,958$$

Según los requerimientos de GIFMod, se busca un cultivo cuyo  $Kc$  sea el más cercano al  $Kc$  obtenido de la Ixora y se encuentra que el  $Kc$  más cercano es el de papa que tiene un  $Kc$  de 0,8; por lo tanto, se realizó una comparación entre la evapotranspiración de la Ixora con los datos del lisímetro y la evapotranspiración de la papa con la simulación de GIFMod.

Para el tercer objetivo “elaborar una comparación entre una cubierta convencional y una cubierta verde extensiva a partir de un evento de mayor precipitación, mostrando los porcentajes de reducción de escorrentía superficial” se presenta a continuación en el ítem 6.4, en donde se expone el método racional, que es el método utilizado para hallar el caudal en una superficie; además se explica la realización de la propuesta del techo verde, el cual se utilizó para la comparación entre un techo convencional y techo verde.

#### **4.5 Comparación entre un techo convencional y un techo verde**

Para los techos convencionales se realizará el cálculo de caudal de entrega al colector principal de la red pluvial de agua lluvia, a partir de los datos de precipitación y área de la superficie, en una zona urbana.

##### **4.5.1 Techo convencional**

###### **4.5.1.1. Método racional**

Para hallar el caudal de un techo convencional usaremos el método racional, que es un sistema de recolección y evacuación de aguas lluvias para zonas de menores áreas, es decir, un área menor a 80 ha. Este método consiste en una precipitación que tiene una intensidad  $I$  y cae homogéneamente sobre una cuenca con un área  $A$ . Si toda esa agua produjo escorrentía, el caudal generado sería:

$$Q = C * I * A$$

Siendo:

$Q$  = Caudal ( $m^3$ /día)

$C$  = Coeficiente de escorrentía

$I$  = Intensidad de precipitación (mm/día)

$A$  = Área de la superficie de la cuenca ( $m^2$ )

### **Coeficiente de escorrentía**

Se le denomina coeficiente de escorrentía al cociente entre de la escorrentía superficial ( $E_s$ ) que es provocada por un aguacero y la precipitación caída ( $P$ ) (MÉTODO DE LOS COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA).

$$C = \frac{E_s}{P}$$

El coeficiente de escorrentía varía entre  $0 \leq C \leq 1$  y depende de varios factores como el tipo de precipitación, es decir, si es lluvia, nieve o granizo; depende de la cantidad, intensidad y distribución; de la humedad inicial del suelo, del tipo de terreno que sale de la granulometría, la textura, su estructura, la cantidad de materia orgánica, el grado de compactación, entre otros; del tipo de capa de vegetación presente (MÉTODO DE LOS COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA).

Las propiedades físicas que mejor explican la formación de la escorrentía superficial durante un evento de precipitación muy fuerte son la infiltración y la permeabilidad (MÉTODO DE LOS COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA).

En el título D de la RAS (Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico) se habla del coeficiente de impermeabilidad o escorrentía y depende del tipo de suelo, de la permeabilidad del área, de la pendiente y de factores que demuestren qué parte de la

precipitación se convierte en esorrentía (SISTEMAS DE RECOLECCIÓN Y EVACUACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS Y AGUAS LLUVIAS, 2016).

### **Intensidad de precipitación**

Es un parámetro que se necesita para estimar el caudal de aguas lluvias, depende del modelo de infiltración. Para el método racional se debe utilizar la intensidad media de precipitación que se muestran en las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF). Las curvas IDF constituyen la base climatológica para la estimación de los caudales, estas curvas sintetizan las características de los eventos extremos máximos de precipitación de una determinada zona y definen la intensidad media (SISTEMAS DE RECOLECCIÓN Y EVACUACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS Y AGUAS LLUVIAS, 2016).

#### **4.5.2 Techo verde**

Para el techo verde se realiza una propuesta técnica para obtener acertadamente los resultados de la comparación.

La cubierta verde propuesta tiene un área de 100 m<sup>2</sup> y contiene el sustrato y la vegetación más óptima y adecuada según la investigación realizada en este proyecto de grado, los cuales fueron como sustrato la vermiculita + compost con un espesor de 15 cm y de vegetación las 2 plantas con mejor evapotranspiración la ixora y la clhorophytum comosum.

Para saber cuántas plantas se iban a sembrar en esa área, se consultó con un especialista en jardinería en el vivero LA ESPAÑOLITA, quien nos enseñó que la siembra tanto de la ixora como de la clhorophytum comosum era de 5 por metro lineal (ML).

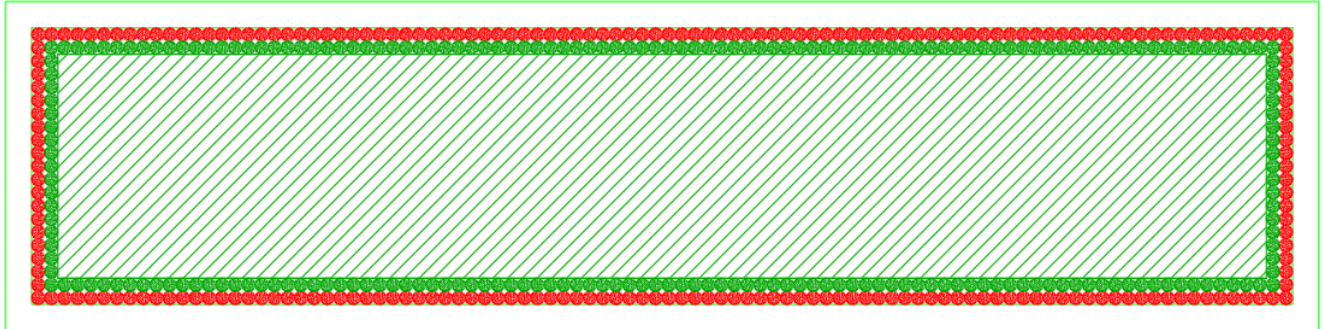


Figura 12. Propuesta de techo verde

Fuente: elaboración propia

En la figura 12 se muestra la cubierta propuesta, la cual tiene un área de 100 m<sup>2</sup> igual a 5 m x 20 m, se realizaron las reglas de 3 para obtener la cantidad de plantas a sembrar.

La parte roja de la figura 12 son las plantas Ixora que se siembran alrededor, en donde se halla la cantidad de Ixoras horizontales de la siguiente manera:

$$5 \text{ plantas} \rightarrow 1 \text{ m}$$

$$X \rightarrow 39,2 \text{ m}$$

$$X = 196 \text{ plantas}$$

Para los lados verticales se resta 0,4 por las plantas que ya están sembradas, por tanto:

$$5 \text{ plantas} \rightarrow 1 \text{ m}$$

$$X \rightarrow 8,4 \text{ m}$$

$$X = 42 \text{ plantas}$$

Teniendo un total de Ixoras de 238 plantas sembradas.

La parte verde que le sigue a la Ixora, son las Clhorophytum comosum que se hallaron igual que la ixora y se restaron las medidas de las plantas para saber los metros lineales.

$$5 \text{ plantas} \rightarrow 1m$$

$$X \rightarrow 38,4 m$$

$$X = 192 \text{ plantas}$$

Y para los lados verticales se resta las plantas de *Clhorophytum comosum* de los lados horizontales.

$$5 \text{ plantas} \rightarrow 1m$$

$$X \rightarrow 7,6 m$$

$$X = 38 \text{ plantas}$$

Teniendo un total de 230 plantas de *Clhorophytum comosum*.

Para la cantidad de sustrato se tuvo en cuenta que para una 1 sola planta con un espesor de sustrato de 15 cm se necesitó 728 g de vermiculita y 342 de compost; por tanto, se realiza una regla de 3 para poder saber la cantidad de vermiculita y de compost, presentándose de la siguiente manera:

Para la cantidad de vermiculita

$$728 g \rightarrow 1 \text{ planta}$$

$$X \rightarrow 468 \text{ plantas}$$

$$X = 340704 g$$

Para la cantidad de compost

$$342 g \rightarrow 1 \text{ planta}$$

$$X \rightarrow 468 \text{ plantas}$$

$$X = 160056 g$$

Teniendo la cantidad de plantas procedemos a elaborar la figura 12 que presenta la infiltración de 1 sola planta de la especie *Clhorophytum comosum* y para obtener el total de infiltración del

techo verde propuesto, multiplicamos cada valor de la infiltración diaria por 230 que son la cantidad de plantas de esta especie; el mismo procedimiento se realiza con la Ixora, se toma la infiltración diaria según los resultados del lisímetro de 1 sola planta de Ixora y cada valor se multiplica por 238 que son la cantidad de plantas Ixora utilizadas en la cubierta verde propuesta.

Como en el techo verde propuesto también se expone un camino de concreto, este caudal se halla utilizando el método racional para un área de 0,00001444 km<sup>2</sup> y obteniendo así el caudal para esa parte de la cubierta.

Finalmente sumamos todas las infiltraciones junto con el caudal del camino de concreto, obteniendo el caudal total diario de la propuesta de techo verde como se muestra en la figura 12.

Para realizar la comparación, tomamos los resultados de caudales diarios del método racional del techo convencional y los resultados de los caudales diarios de la propuesta de techo verde para evidenciar que un techo verde disminuye notoriamente la escorrentía superficial.

#### **4.6 Análisis de viabilidad técnica**

Un análisis de viabilidad es un análisis que se realiza a un proyecto para saber el éxito o el fracaso de éste; y un análisis de viabilidad técnica se refiere a las aplicaciones tecnológicas y naturales que se encuentren dentro del proyecto, es decir, si realmente es posible desarrollar eficientemente el proyecto desde un punto de vista tecnológico.

En el proyecto de grado “Impacto medioambiental del uso de techos y muros verdes sobre edificios en la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana”, se encontró una cubierta verde extensiva en una obra conocida como “La Cabecera”; este proyecto fue realizado por la constructora URBANAS SAS y fue más que todo por petición de los residentes del edificio que

querían tener una mejor visibilidad en sentido de estética. Fue la primera cubierta verde que realizaron en la ciudad de Bucaramanga en el año 2007.

Se buscó la comunicación con la arquitecta de URBANAS SAS y comentó que en esa época (2007) trabajaron con TÓXEMENT, una empresa dedicada a ofrecer productos y servicios a las empresas de cemento y construcción; dentro de los productos se encuentran las cubiertas verdes y jardines verticales; ahora URBANAS SAS trabaja con un arquitecto, quien tiene una empresa conocida como CASA AMBIENTE SAS que emplean techos y muros verdes en la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana; su último trabajo fue una cubierta ajardinada en una casa en Ruitoque Condominio, como se muestra en la figura 13.



*Figura 13. Cubierta verde en Ruitoque Condominio*

Fuente: CASA AMBIENTE S.A.S

Esta empresa está dedicada a la elaboración de cubiertas verdes y jardines verticales, y la elaboración depende de lo que el cliente desea y/o necesita; la mayoría de los casos es por estética, aunque claramente los beneficios que se tienen son muy grandes. El cliente es quien decide primero el dinero que tiene presupuestado para su techo o muro verde; segundo si lo quiere para paso de

personas (en caso de techos), si desea para disminuir la temperatura dentro de la estructura (ya sea casa o edificio), si lo desea para la retención de agua, etc.

Complementando con lo anterior, para la escogencia de la vegetación, lo primero que hay que ver es el clima en donde se desea instalar la cubierta, lo segundo es si la vegetación necesita de sombra, semi-sombra o sol y lo tercero es que la altura de la vegetación depende del espesor del sustrato. No se puede tener un guayacán que es un árbol grande con un sustrato de 8 cm, también depende de la cantidad de agua que se desea retener, es decir de la permeabilidad de la cubierta.

La cubierta verde está compuesta por:

1. Media caña
2. Perfiles perimetrales en PVC que se adhieren a la pared
3. Capa permeabilizante
4. Lámina drenante SIKA 32T
5. Dragante para la filtración del agua
6. Manto geotextil
7. Triturado
8. Manto geotextil anti raíz
9. Sustrato
10. Vegetación

Como sustrato usan:

1. 40% de tierra negra
2. 30% de materia orgánica
3. 20% de tamo (cascarilla de arroz)
4. 10% de arena

Para la vegetación como se había dicho anteriormente depende de varios factores, pero para los techos verdes extensivos las que más se usan son las plantas que tienen una necesidad hídrica muy mínima como la *Chlorophytum comosum* (Malamadre), las plantas de té, los césped o pastos, el maní forrajero, los margaritones, entre otros.

El Arquitecto de CASA AMBIENTE SAS, hizo un modelo de presupuesto para una cubierta rectangular de 4,48x6.90m con espesor de sustrato de 27 cm y como vegetación prado japonés, como se muestra en la figura 14.

PRESUPUESTO CUBIERTA VERDE					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VR/UNITARIO	VR/TOTAL
1	Impermeabilización cubierta verde geomembrana	m2	37,1	\$ 61.326	\$ 2.275.195
2	Anclaje perimetral: Comprende el suministro e instalación perfil de fondo y perfil de borde, sello final con Sikadur 32 Primer, Sika Primer 215 y Sikaflex Construction	ml	46	\$ 29.107	\$ 1.338.922
3	Proteccion y escorrentia de agua: Comprende el suministro e instalación de lámina de polietileno extruido sika drenaje 32T y tela final para evitar el paso de finos Geotextil NT 1600	m2	31	\$ 30.543	\$ 946.833
4	Lecho filtrante espesor 0,05 m	m3	1,54	\$ 85.000	\$ 130.900
5	Sustrato espesor 0,27m	m3	8,34	\$ 100.000	\$ 834.000
6	Prado Japones	m2	31	\$ 13.000	\$ 403.000
8	Mano de Obra	m2	31	\$ 8.000	\$ 248.000
<b>SUBTOTAL</b>					<b>\$ 6.176.850</b>
<b>Administración</b>			<b>10%</b>		<b>\$ 617.685</b>
<b>Imprevistos</b>			<b>10%</b>		<b>\$ 617.685</b>
<b>Utilidad</b>			<b>10%</b>		<b>\$ 617.685</b>
<b>COSTO INDIRECTO</b>					<b>\$ 1.853.055</b>
<b>IVA sobre Utilidad</b>			<b>19%</b>		<b>\$ 117.360</b>
<b>TOTAL</b>					<b>\$ 8.147.265</b>

Figura 14. Presupuesto de cubierta verde

Fuente CASA AMBIENTE SAS

Otro dato que la Arquitecta de URBANAS SAS dio sobre otra empresa que se encarga de la instalación de cubiertas verdes, es la empresa TOXEMENT; TOXEMENT es una empresa encargada de ofrecer productos y servicios a industrias de cemento y construcción.

Para el caso de las cubiertas verdes, TOXEMENT no las construye completamente. Para el sustrato y la vegetación es otra empresa encargada ya sea arquitectos paisajísticos o los viveros.

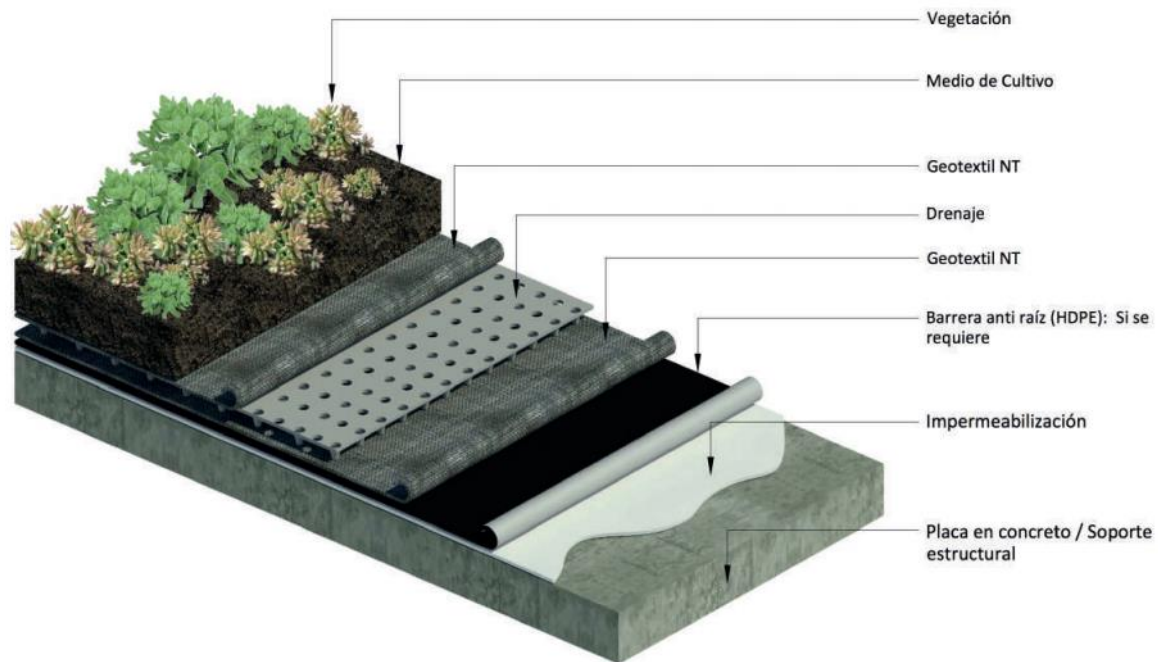
Se habló con uno de los ingenieros que trabaja en la empresa TOXEMENT y comentó sobre el proceso constructivo que utilizan para las cubiertas verdes. La empresa no maneja presupuesto como tal, sino maneja los precios de cada elemento o componente. Esta empresa es reconocida a nivel mundial, por lo tanto, trabaja bajo certificaciones de edificaciones. En el caso de Colombia tiene 3 certificaciones para las cubiertas verdes las cuales son: CASA COLOMBIA, LEED Y EDGE.

CASA COLOMBIA es un sistema de certificación enfocado a la construcción sostenible, el cual, desea generar un ambiente agradable y saludable para las personas respetando el medio ambiente. Comprende 7 categorías, sostenibilidad en el entorno, sostenibilidad en obra, eficiencia en agua, eficiencia en energía, eficiencia en materiales, bienestar y responsabilidad social.

LEED por sus siglas en inglés LEADERSHIP IN ENERGY & ENVIRONMENTAL DESIGN (LIDERAZGO EN ENERGÍA Y DISEÑO AMBIENTAL), este sistema de certificación está compuesto por varios puntos los cuales 6 de ellos son los que más lo caracterizan, la construcción sustentable, eficiencia en el uso del agua, energía y atmósfera, materiales y recursos, calidad del ambiente interior y el diseño innovador.

EDGE por sus siglas en inglés Excellent In Design For Greater Efficiencies (Excelencia En Diseño Para Mejores Eficiencias), este sistema es para edificios ecológicos, el cual hace que sea mayor la posibilidad de construir edificios sustentables en donde incluye no solo viviendas sino también hoteles, hospitales, oficinas y comercio. CAMACOL es la empresa encargada de proveer los servicios de certificados EDGE acá en Colombia.

Para obtener este certificado se deben cumplir 3 parámetros importantes, 20% menos de consumo de energía, 20% menos de consumo de agua y 20% menos de energía incorporada en los materiales.



*Figura 15. Capas de una cubierta verde*

Fuente: Tomado de la empresa TOXEMENT.

Como se puede observar en la figura 15, la cubierta verde que instala la empresa TOXEMENT está compuesta por 8 capas:

1. Vegetación.
2. Medio de cultivo – Sustrato.
3. Geotextil NT.
4. Membrana de drenaje.
5. Geotextil NT.
6. Barrera anti raíz.
7. Membrana de impermeabilización.

## 8. Placa de concreto.

Lo que realmente implementan ellos es hasta la capa #6, como se había dicho anteriormente, el sustrato y la vegetación se encarga otra empresa. Aun así, TOXEMENT tiene en cuenta aspectos para el sustrato y la vegetación; para el sustrato si es el caso de un techo verde extensivo debe tener un espesor entre 5 y 15 cm, su peso, saturado con agua debe variar entre los  $50 \text{ kg/m}^2$  y  $70 \text{ kg/m}^2$ , debe estar compuesto por materia inorgánica y material volcánico; para la vegetación recomiendan plantas rastreras o cubre suelos, plantas las cuales su raíz no sea vigorosa y su altura por máximo hasta los 80cm.

Una de las cosas más importantes en una cubierta verde, sea del tipo que sea, es la gestión de agua; ¿por qué es tan importante?, porque puede crear infiltración, la raíz de la planta puede introducirse en el concreto y puede generar aumento en la carga haciendo fallar la estructura.

Para la membrana de drenaje, es una capa que parece como cartones de huevo, es muy delicado saber hacia qué lado se coloca, ya que por un lado retiene agua y por el otro lado deja fluir, entonces, ahí debemos tener en cuenta el tipo de clima en el que se quiere instalar el techo verde porque si es un clima cálido es necesario que la membrana de drenaje retenga agua para así mantener el sustrato y la vegetación; pero si es un clima como frío y lluvioso la membrana se coloca hacia el otro lado permitiendo así el paso del agua hacia el sistema de desagüe; junto a esta membrana es importante incluir un geotextil no tejido para evitar que el sustrato no se infiltre y sature el sistema, este geotextil debe instalarse antes y después de la membrana de drenaje.

La barrera anti raíz puede ser física o química y como su nombre lo indica, es la que evita que las raíces de las plantas traspasen la membrana de impermeabilización, ya que las raíces por buscar nutrientes son capaces de introducirse en la placa de concreto; por lo tanto, es necesario saber el tipo de vegetación que se sembrará.

La membrana de impermeabilización es la encargada de impedir el acceso de agua ya sea de riego o lluvia a la estructura; a esta capa después de instalada es necesario realizar una prueba de impermeabilización, para así verificar que efectivamente quedó bien instalada y no hay ningún lugar donde se pueda infiltrar el agua, si esta prueba no se realiza después es muy complicado hacerle mantenimiento, ya que esta capa está debajo de las demás.

Para la placa de concreto, desde la etapa de diseño del proyecto debe estar que en ese proyecto se instalará un techo verde, porque esta placa debe soportar la carga de la cubierta con todas las capas, incluyendo la vegetación y el sustrato; adicional, se debe incluir el peso muerto del techo totalmente saturado y la carga viva; para este caso que son cubiertas verdes extensivas, el peso saturado debe variar entre  $100 \text{ kg/m}^2$  y  $190 \text{ kg/m}^2$  y el concreto debe tener una resistencia a la compresión de 3000 psi.

## 5. Resultados y discusión

Para dar respuesta al primer objetivo: se determinó el tipo de sustrato y vegetación presente en un techo verde extensivo por medio de revisión bibliográfica y realizando un lisímetro para hallar la evapotranspiración y la infiltración experimental en el tipo de vegetación, de la siguiente manera:

### 5.1 Lisímetro

#### 5.1.1 Adaptación de las plantas al nuevo sustrato

Para esta etapa de adaptación se tomó el criterio de hacer un riego diario sin saturar el sustrato, esto se hizo durante 15 días para determinar si la especie se adaptaba al nuevo sustrato o por lo contrario la planta tenía un punto de marchitez y con esto su muerte.

Lo que se notó es que el sustrato de vermiculita con compost era más provechoso en nutriente ya que se evidenció el crecimiento y el afloramiento de las especies en comparación con el sustrato de perlita con turba que sus especies fueron de crecimiento más lento como se muestran en las figura 16 y 17.



*Figura 16. Camellia Sinensis (Té)*

Fuente: elaboración propia



*Figura 17. Duranta Erecta (Duranta)*

Fuente: elaboración propia

Durante el ciclo de adaptación de las especies a cada uno de los sustratos se observó que la especie ixora tuvo un punto de marchites en el sustrato de perlita con turba; esta especie no se adaptó y murió al contrario de la que estaba sembrada en vermiculita compost.

### **5.1.2 Porcentaje de humedad de sustrato**

Para motivos de simulación se determina el contenido de humedad del suelo, este ensayo tiene la finalidad de conocer el porcentaje de agua presente en un suelo lo que nos puede demostrar que un suelo con mayor capilaridad puede tener mayor número de vacíos y gran cantidad de aire.

El método utilizado en esta investigación fue el tradicional tomando una muestra significativa del suelo, en este caso 400 gramos de sustrato, en el caso de la vermiculita y la perlita son materiales secos y el compost como la turba están en un estado seco, en este caso se tomó una muestra de cada uno de los sustratos previamente mezclados y se le agregó agua hasta que el sustrato tuviera una saturación leve y de esta manera se determinó que el porcentaje de humedad de los sustratos era de un 20%.

### 5.1.3 Resultados de evapotranspiración e infiltración a partir del lisímetro

#### 5.1.3.1 Evapotranspiración

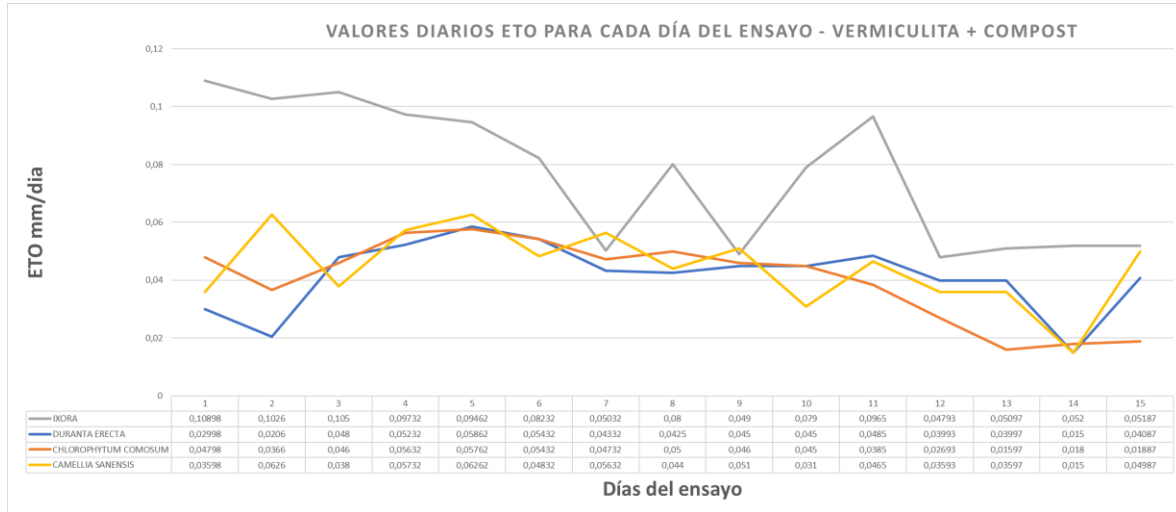


Figura 18. Evapotranspiración de todas las especies durante los días de lisímetro – Sustrato Vermiculita + Compost

Fuente: elaboración propia

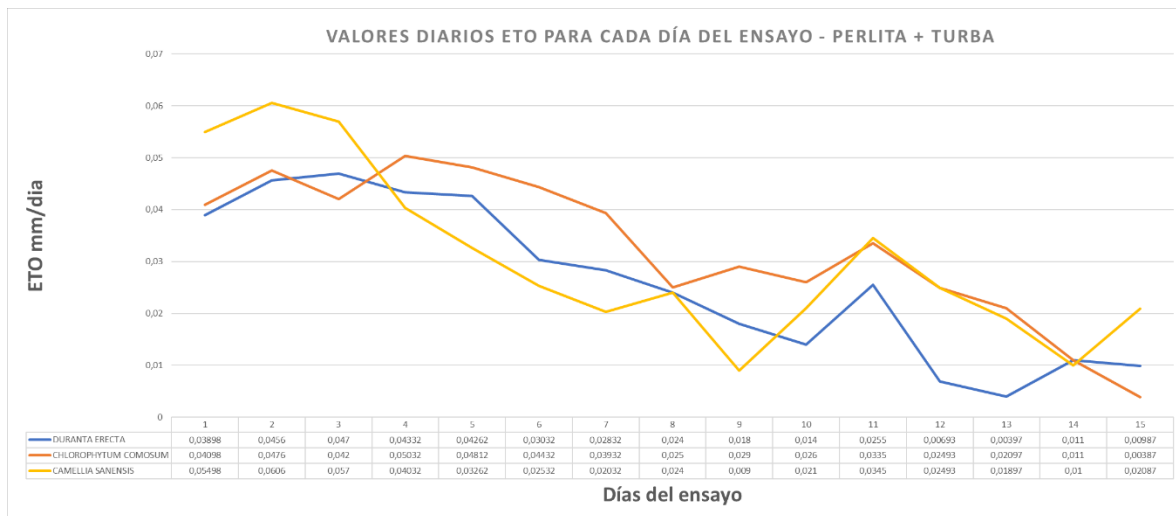


Figura 19. Evapotranspiración de todas las especies en los días de lisímetro – Sustrato Perlita + Turba

Fuente: elaboración propia

En las figuras 18 y 19 se presentan las evapotranspiraciones de cada especie durante los días del lisímetro; en los anexos B, C, D y E se muestran las tablas y las gráficas de diferencia de cada sustrato en cada especie escogida.

Como se puede observar, el sustrato más óptimo en este caso es el de la Vermiculita con Compost, por las propiedades químicas y físicas que cada uno posee; en el caso del compost, el compost le brinda propiedades químicas como el nitrógeno, fósforo, potasio, hierro y azufre, esto ayuda a la fertilización de la planta, tiene una gran capacidad de absorción de agua e inhibe el crecimiento de hongos y bacterias evitando la afectación en las plantas. Por el lado de las propiedades físicas mejora la porosidad del suelo mejorando la permeabilidad y ventilación e incrementando la capacidad de retención de humedad, también reduce la erosión del suelo.

La vermiculita tiene la capacidad de retener agua hasta 5 veces su peso, esto hace que pueda rehidratar a otros sustratos; tiene una alta porosidad haciendo que las raíces tengan más aireación; tiene una elevada capacidad de almacenar nutrientes como potasio, calcio, magnesio, amonio, entre otros; evita las plagas, enfermedades y malezas y su principal propiedad es que es un gran aislante térmico.

Se observa en la figura 18 que el comportamiento de la Ixora es el más notorio y el más variable, esto quiere decir que en los picos más altos fueron los días de mayor precipitación y también demuestra que la Ixora es una excelente planta para una cubierta verde extensiva, coincidiendo con el proyecto de grado “Impacto medioambiental del uso de techos y muros verdes sobre edificios en la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana” de Alba Yureima Quintero y Jennifer Alejandra Valcarcel; en donde mencionan la Ixora como una de las mejores especies para el manejo de la escorrentía en la ciudad de Bucaramanga.

En la figura 19 sólo se graficaron la evapotranspiración de 3 especies ya que la especie Ixora con este sustrato no sobrevivió a las condiciones del lisímetro provocando su muerte.

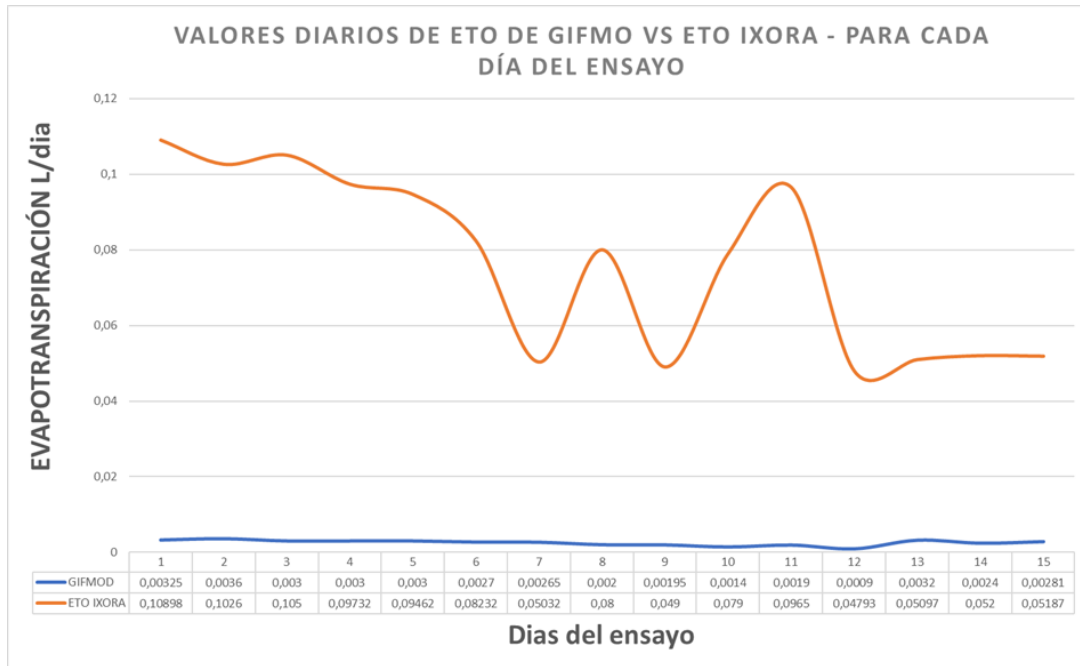


Figura 20 Evapotranspiración de la ixora vs evapotranspiración de gifmod

Fuente: elaboración propia.

Se realizó una comparación entre la simulación de Gifmod y los resultados de evapotranspiración del lisímetro con la especie Ixora, comprobando una vez más que la Ixora es una excelente especie para sembrarla en una cubierta verde con beneficio de gestión de escorrentía superficial.

### 5.1.3.2 Infiltración

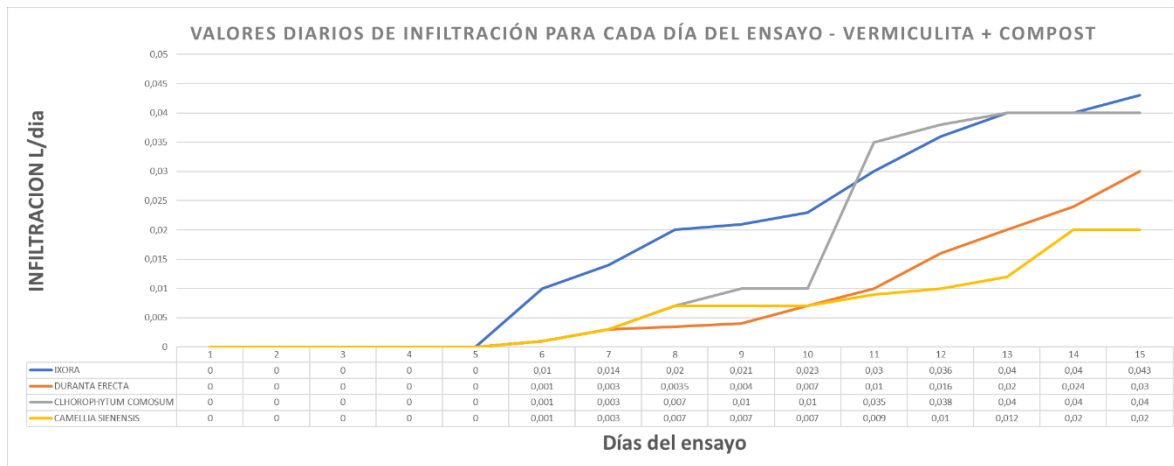


Figura 21. Infiltración de las especies en los días de lisímetro – Sustrato Vermiculita + Compost

Fuente: elaboración propia.

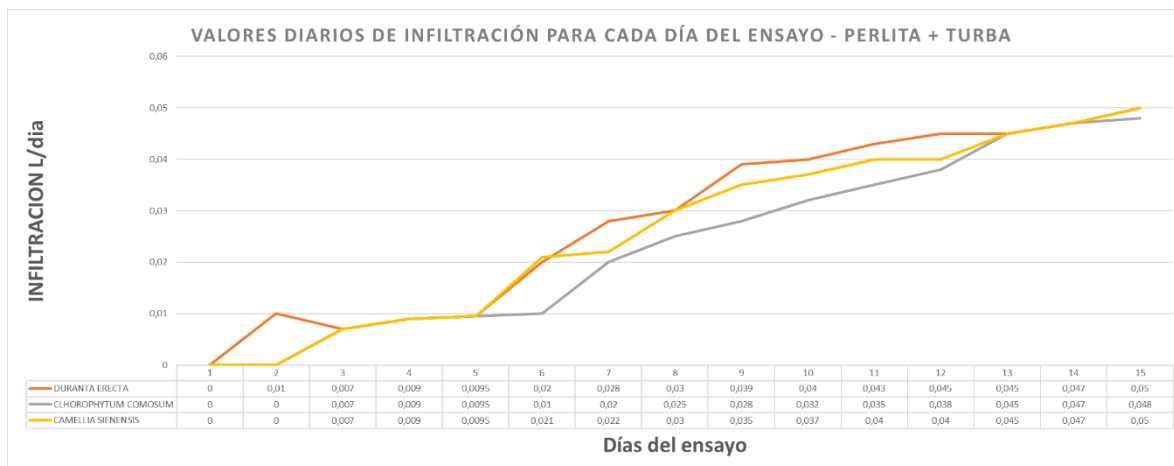


Figura 22. Infiltración de las especies en los días de lisímetro – Sustrato Perlita + Turba

Fuente: elaboración propia.

Las figuras 21 y 22 muestra la infiltración de las especies seleccionadas en cada uno de los sustratos escogidos; en estas gráficas se comprueba que, entre más cantidad de agua, mayor es la evapotranspiración y menor es la infiltración.

## 5.2 Modelo en GIFMOD

Como se demostró en la Tabla 3 que es la matriz comparativa de programas de modelación hidrológica en el capítulo 7 de este proyecto, el software que más favorece es el programa de GifMOD.

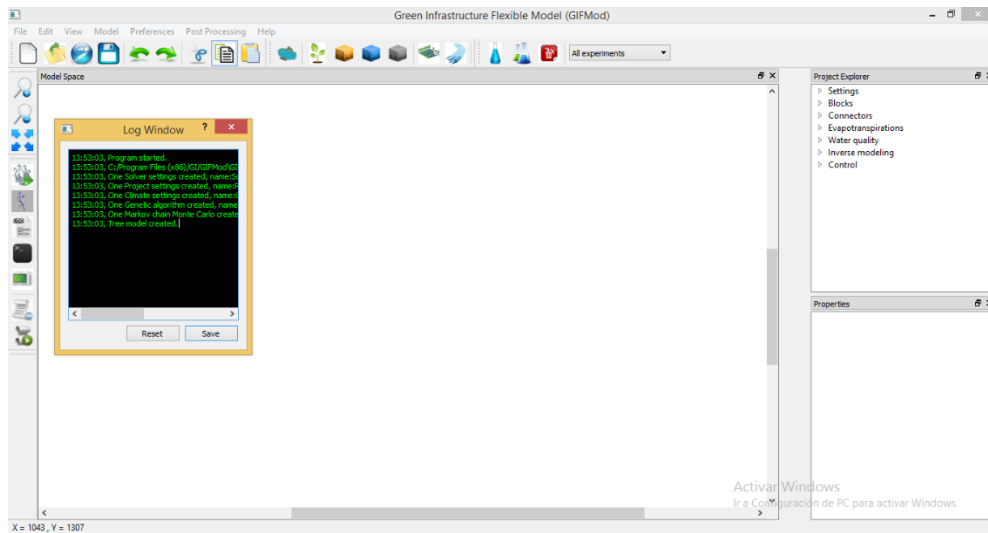


Figura 23. Software GIFMOD

Fuente: GIFMOD.

El GIFMod es un software de modelación que trabaja bajo un sistema de bloques, donde cada uno de ellos cumple un diferente propósito. Para este proyecto se utilizaron dos tipos de bloques, uno que representa el tipo de planta, seguido del sustrato que encontramos.

Al seleccionar los dos bloques con los cuales se trabajará, se prosigue a asignar una conexión entre ellos, que es representada por una flecha que se crea seleccionando el bloque de tipo planta, arrastra hasta el bloque de tipo suelo y se le asigna una longitud que sería la mitad de la profundidad del sustrato, como se muestran en las figuras 24 y 25.

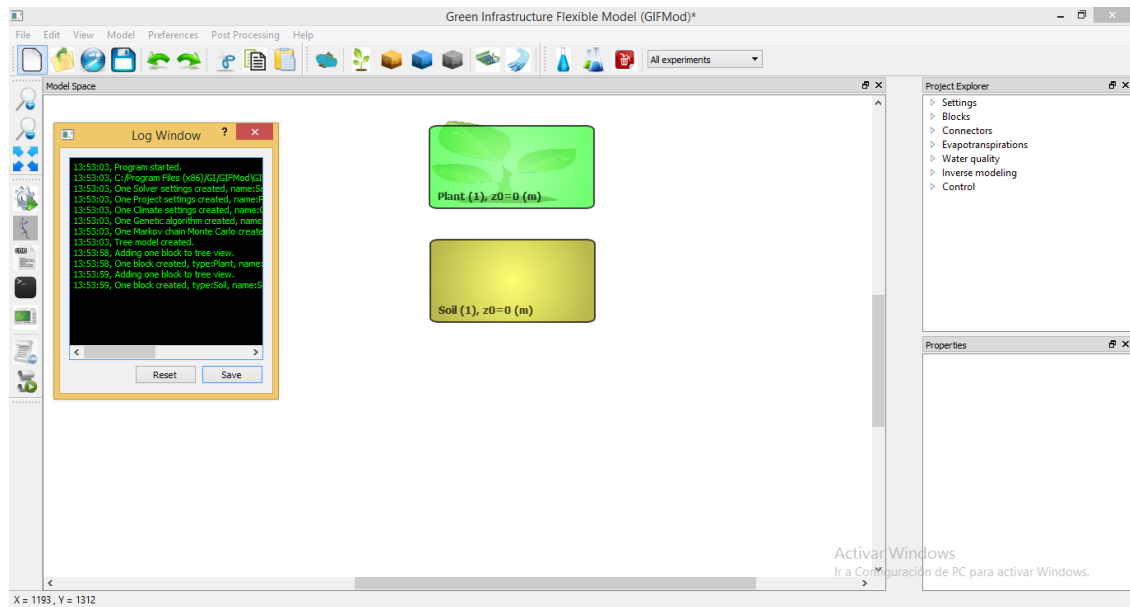


Figura 24. Software GIFMOD – Bloques de sustrato y vegetación

Fuente: GIFMOD.

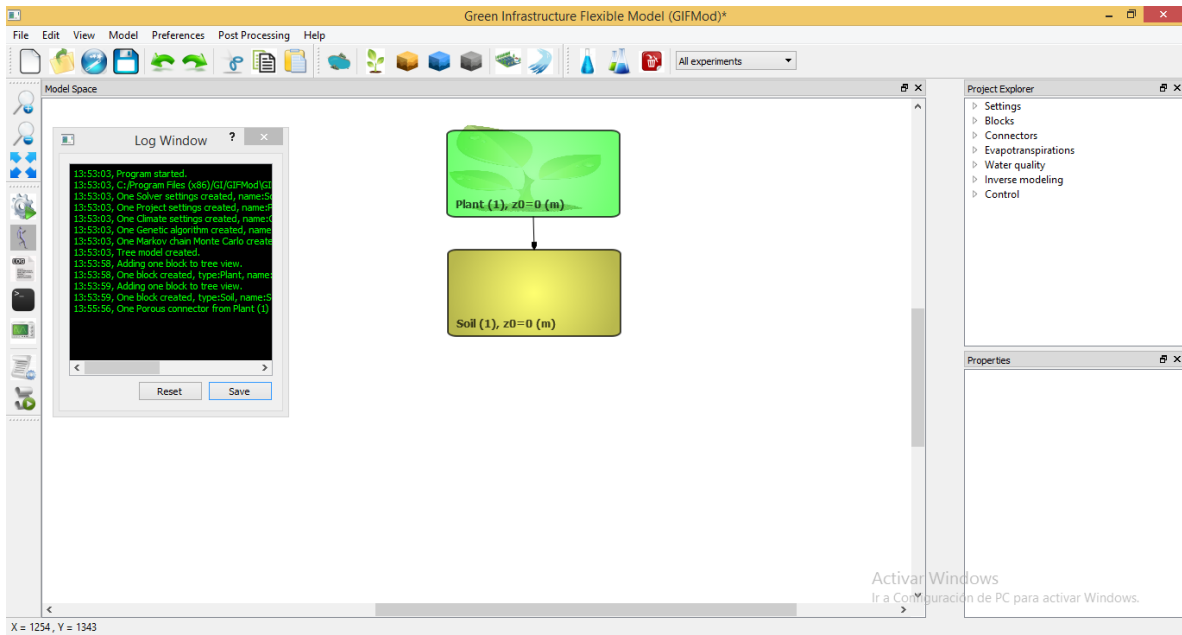


Figura 25. Software GIFMOD – Unión de planta y sustrato

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se le asignan propiedades a cada uno de ellos, como por ejemplo el área de siembra, tipo de planta, si llevara evapotranspiración entre otros; esto para el bloque tipo planta. En el bloque de suelo, se asigna que tipo de suelo es, el área, profundidad del sustrato entre otros. En la parte superior derecha en configuración, se selecciona el periodo de modelación en día, mes y año. En la misma casilla de configuración se seleccionan los parámetros climáticos, los cuales son 5, entre ellos 4 son obligatorios que son radiación solar, temperatura, velocidad del viento y humedad. Hay un quinto que es la precipitación, el modelo puede correr sin este. Son representados por el programa bajo estos esquemas que se muestran en las figuras 26, 27, 28 y 29 a continuación.

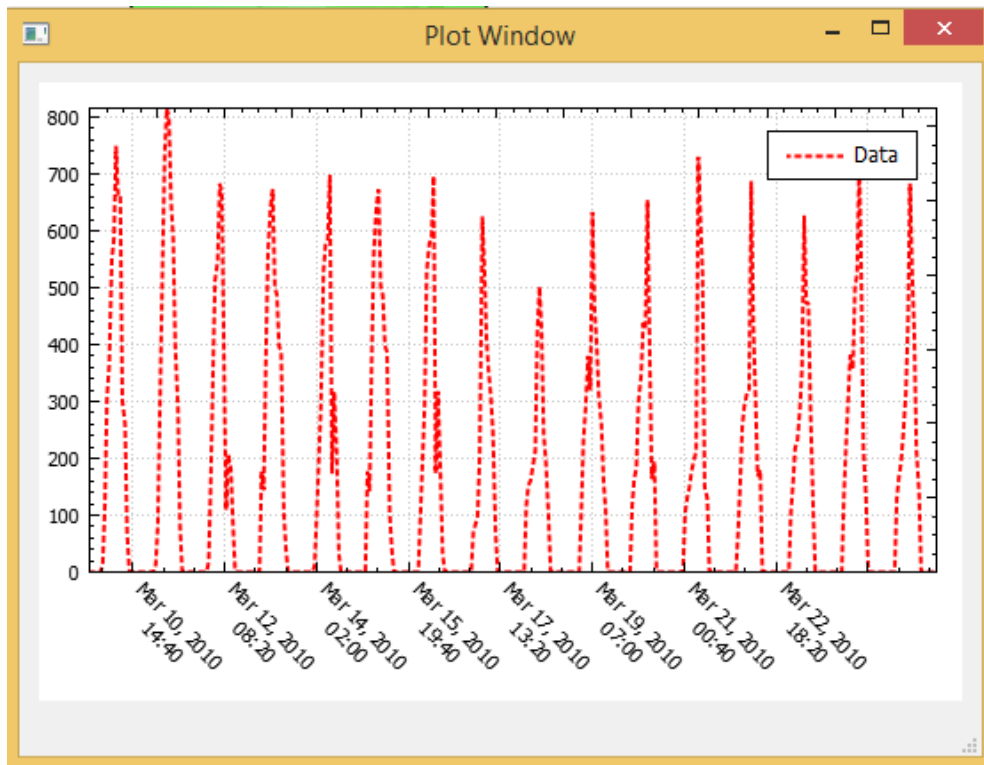


Figura 26. Radiación – GIFMOD

Fuente: GIFMOD

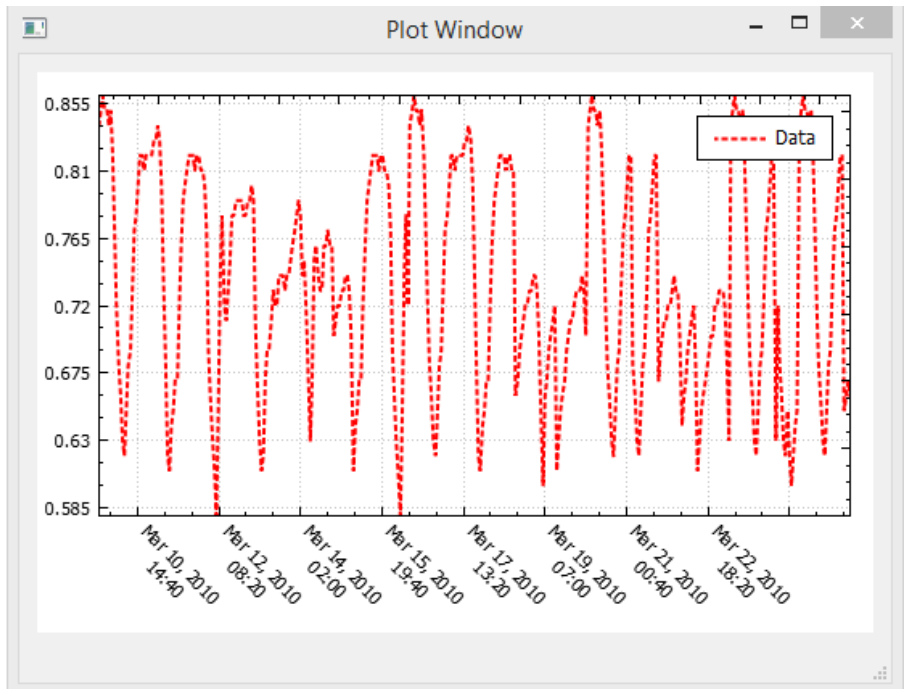


Figura 27. Humedad – GIFMOD

Fuente: GIFMOD.

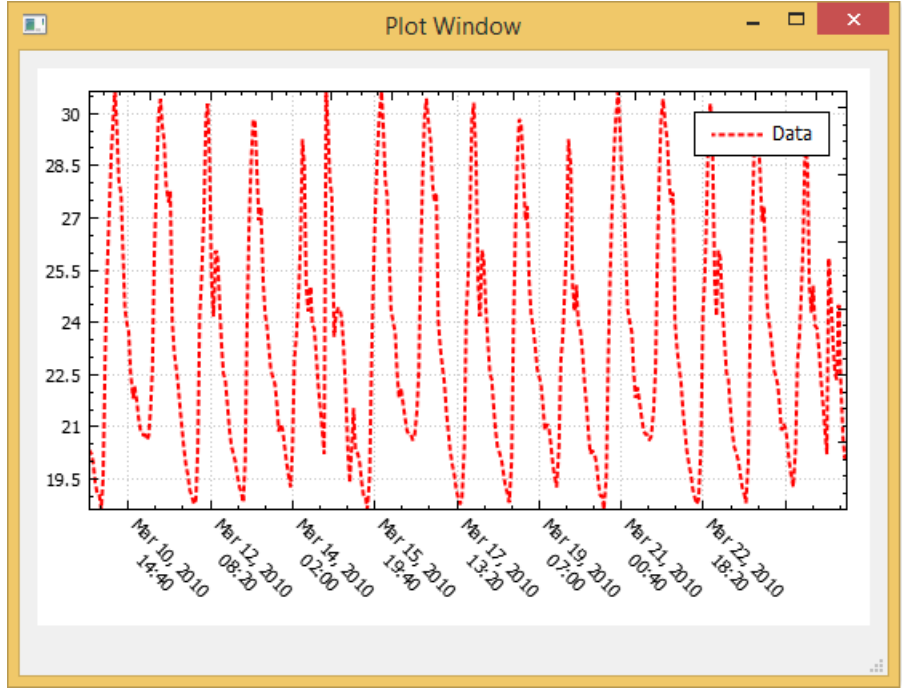


Figura 28. Temperatura – GIFMOD

Fuente: GIFMOD

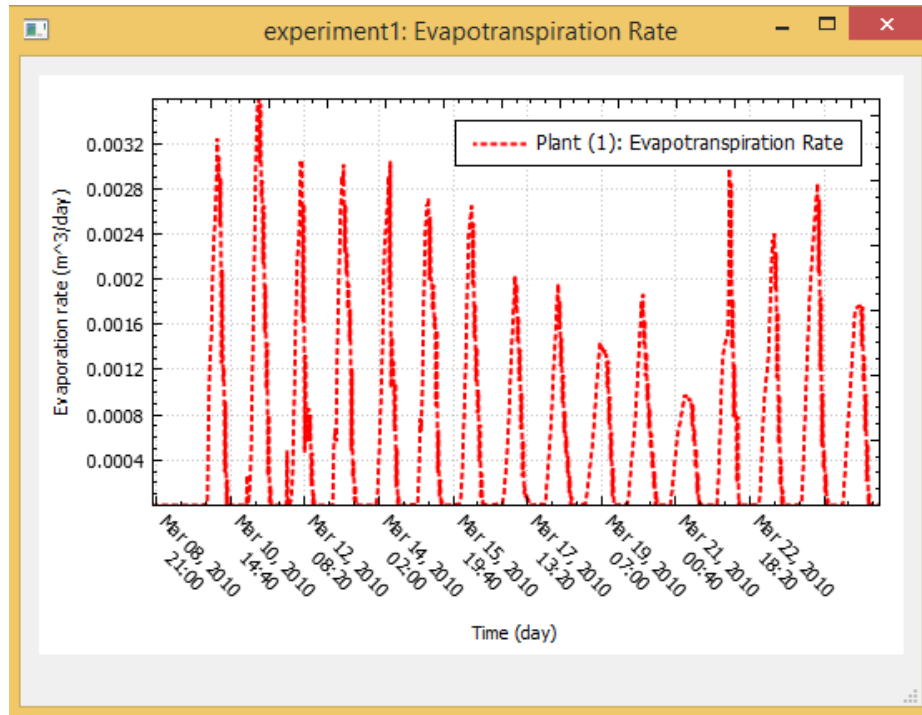


Figura 29. Viento – GIFMOD

Fuente: GIFMOD

Una vez se ponen estos datos se puede proseguir a correr el modelo, ya que se ha fijado en el software el tiempo por el cual se va a modelar y las condiciones climáticas, las cuales se han tomado por la estación pluviométrica ubicada en la universidad pontificia bolivariana.

### 5.2.2 Evapotranspiración

Para la simulación en el software de GIFMod, se tomaron datos de entrada como lo son la temperatura, viento, radiación y humedad, estos datos se recopilieron del proyecto de grado de Carlos Cucaita de la Universidad Pontificia Bolivariana (2020) y como no tenían datos de precipitación en la simulación del software, se sacó información de precipitación de la estación meteorológica más cercana a la UPB que es la de La Granja y se introdujeron datos desde 1980 hasta 2019 buscando el lapso de tiempo de mayor precipitación y se encontró que fue en Marzo del 2010.

## Cultivo de siembra: Papa

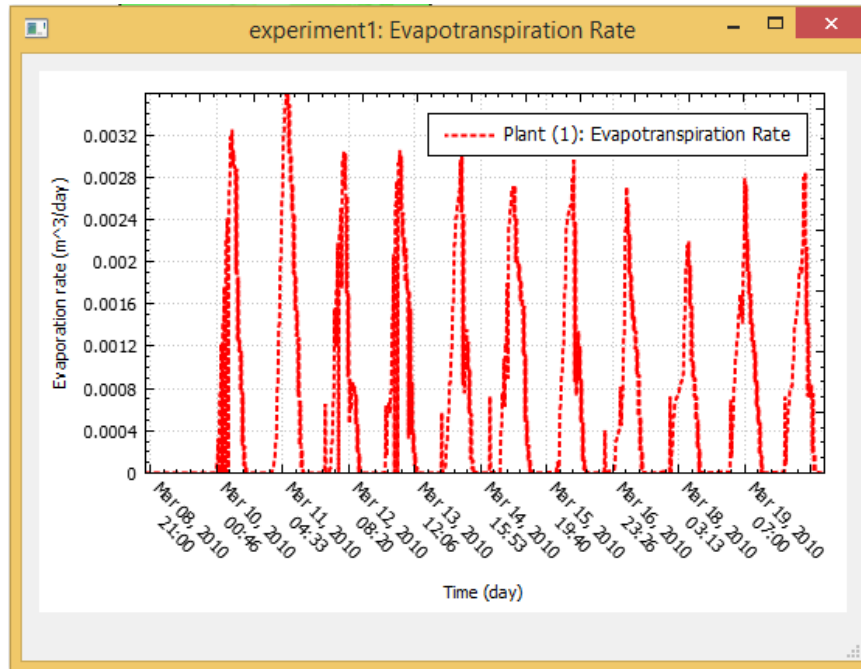


Figura 30 Evapotranspiración con papa como cultivo de siembra en un área de 100 m<sup>2</sup> teniendo en cuenta la precipitación suministrada por la estación meteorológica LA GRANJA, ubicada en el municipio de Piedecuesta

Fuente: elaboración propia.

La evapotranspiración se basó en un cultivo de siembra de papa, debido a que dentro de los bloques de Gifmod que se asignan para la parte de la vegetación dentro de la simulación se enfocan más hacia la agricultura.

Dentro de los bloques asignados en el software sólo se pueden encontrar plantas como el maíz, la papa, el arroz, entre otros; determinando así que no hay una especie determinada similar a la estudiada en esta investigación, por tal motivo se decide tomar el bloque de siembra de papa para realizar la simulación cercana a las especies estudiadas.

El gifmod tiene lenguaje de programación c++ puede añadir otra especie de vegetación. Tener en cuenta que se escogió gifmod porque es de libre acceso, el gifmod no da resultados de infiltraciones y es para mirar el comportamiento de un cultivo dependiendo de la precipitación.

### 5.3 Comparación entre un techo convencional y un techo verde

Para el desarrollo del objetivo específico: elaboración de una comparación entre una cubierta convencional y una cubierta verde extensivo a partir de un evento de mayor precipitación, mostrando los porcentajes de reducción de escorrentía superficial, se procedió de la siguiente manera:

#### 5.3.1 Techo convencional

<b>MÉTODO RACIONAL</b>				
<b>FECHA</b>	<b>COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA (C)</b>	<b>INTENSIDAD (m/día)</b>	<b>ÁREA (m<sup>2</sup>)</b>	<b>CAUDAL (m<sup>3</sup>/día)</b>
7/10/2020	0,48	0,6	100	28,8
8/10/2020	0,48	2	100	96
9/10/2020	0,48	0	100	0
10/10/2020	0,48	0,4	100	19,2
11/10/2020	0,48	1,4	100	67,2
12/10/2020	0,48	0,4	100	19,2
13/10/2020	0,48	0,4	100	19,2
14/10/2020	0,48	0	100	0
15/10/2020	0,48	0	100	0
16/10/2020	0,48	0	100	0
17/10/2020	0,48	5	100	240
18/10/2020	0,48	2,1	100	100,8
19/10/2020	0,48	0,9	100	43,2
20/10/2020	0,48	0	100	0
21/10/2020	0,48	3,9	100	187,2

Figura 31. Matriz para hallar el caudal de un techo convencional utilizando el método racional

Fuente: elaboración propia.

Para la figura 31 se utilizó el método racional para hallar el caudal diario de un techo convencional de placa de concreto, en los días que se realizó el lisímetro, para tener en cuenta la precipitación de esos días que fueron del 7 de octubre de 2020 al 21 de octubre de 2020 y poder realizar la comparación entre los caudales según la tipología del techo.

Como ya se había hablado en el capítulo 7, la ecuación del método racional es la siguiente:

$$Q = C * I * A$$

Si observamos la figura 31 utilizamos un coeficiente de escorrentía de 0,48 según el proyecto de grado “Metodologías para la estimación del coeficiente de escorrentía en áreas urbanizadas mediante teledetección” (CHIARITO, ZIMMERMANN, & MÉNDEZ ZACARÍAS).

La intensidad en mm/día es tomada y referenciada de la estación pluviométrica LA GRANJA - Piedecuesta del IDEAM; esta refleja los datos desde las 0 h hasta las 0 h del día siguiente, por lo cual nos da un solo dato por día y la estación no está capacitada para dar los datos cada 5 minutos como otras estaciones, por tal motivo se conoce mm/día.

Para poder hallar el caudal en m<sup>3</sup>/día, la intensidad se deja en mm/día ya que 1 mm de lámina de agua lluvia se ocupa en 1 m<sup>2</sup> de la superficie terrestre y se multiplica por el área en m<sup>2</sup> y por el coeficiente de escorrentía, para así obtener los resultados expuestos en la figura 31.

### **5.3.2 Techo verde**

Para hallar el caudal del techo verde estimamos la misma área que el techo convencional 100 m<sup>2</sup>, utilizamos las plantas con la evapotranspiración e infiltración más óptima según los datos del lisímetro, las cuales fueron la Ixora y la Chlorophytu Comosum, y se tuvo en cuenta la parte de concreto que tiene el techo verde, como se muestra en la figura 12.

En el lisímetro se obtuvo la infiltración de una sola planta y como se muestra en la ilustración, en este caso, para el techo verde se necesitan 238 plantas de Ixora y 230 plantas de Chlorophytum comosum; las infiltraciones se muestran en las siguientes figuras 32 y 33:

CLHOROPHYTUM COMOSUM		
NÚMERO DE PLANTAS	1	230
INFILTRACIÓN	0	0
	0	0
	0	0
	0	0
	0	0
	0,001	0,23
	0,003	0,69
	0,007	1,61
	0,01	2,3
	0,01	2,3
	0,035	8,05
	0,038	8,74
	0,04	9,2
	0,04	9,2
0,04	9,2	

Figura 32 Infiltración de plantas para la especie *CLHOROPHYTUM COMOSUM*

Fuente: elaboración propia.

IXORA		
NÚMERO DE PLANTAS	1	238
INFILTRACIÓN	0	0
	0	0
	0	0
	0	0
	0	0
	0,01	2,38
	0,014	3,332
	0,02	4,76
	0,021	4,998
	0,023	5,474
	0,03	7,14
	0,036	8,568
	0,04	9,52
	0,04	9,52
	0,043	10,234

Figura 33 Infiltración de plantas para la especie *IXORA*

Fuente: elaboración propia.

Para hallar la escorrentía superficial de la parte de concreto del techo verde, se utilizó el método racional como se muestra en la siguiente figura 34 y el área se halló según la figura 12.

COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA (C)	INTENSIDAD (mm/día)	ÁREA (m2)	CAUDAL (m3/día)
0,48	0,6	14,44	4,15872
0,48	2	14,44	13,8624
0,48	0	14,44	0
0,48	0,4	14,44	2,77248
0,48	1,4	14,44	9,70368
0,48	0,4	14,44	2,77248
0,48	0,4	14,44	2,77248
0,48	0	14,44	0
0,48	0	14,44	0
0,48	0	14,44	0
0,48	5	14,44	34,656
0,48	2,1	14,44	14,55552
0,48	0,9	14,44	6,23808
0,48	0	14,44	0
0,48	3,9	14,44	27,03168

*Figura 34 Caudal del espacio en concreto del techo verde utilizando el método racional*

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido todos los datos, se suman las infiltraciones de las plantas y el caudal del espacio en concreto del techo verde, para así obtener el caudal total de cada uno de los días del lisímetro.

### **5.3.3 Diferencia de caudales**

Para diferencial los caudales de cada uno de los techos, se realizó una matriz comparativa, una gráfica de comparación de caudales y una gráfica comparando porcentajes, donde muestran los valores obtenidos según los procedimientos realizados, como se muestran en las siguientes figuras 35, 36 y 37.

<b>MATRIZ COMPARATIVA DE CAUDALES</b>		
CAUDAL (m3/día)		
TECHO CONVECCIONAL	TECHO VERDE	DIFERENCIA
28,800	4,159	24,641
96,000	13,862	82,138
0,000	0	0,000
19,200	2,772	16,428
67,200	9,704	57,496
19,200	5,382	13,818
19,200	6,794	12,406
0,000	6,37	
0,000	7,298	
0,000	7,774	
240,000	49,846	190,154
100,800	31,864	68,936
43,200	24,958	18,242
0,000	18,72	
187,200	46,466	140,734

Figura 35 Matriz comparativa de caudales según la tipología de techos

Fuente: elaboración propia.

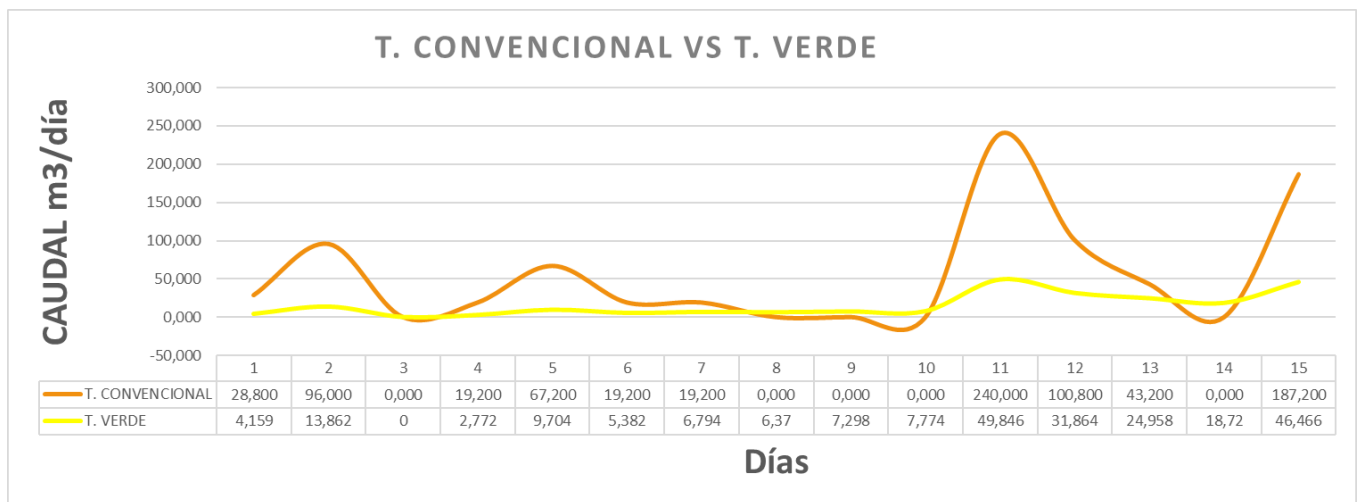
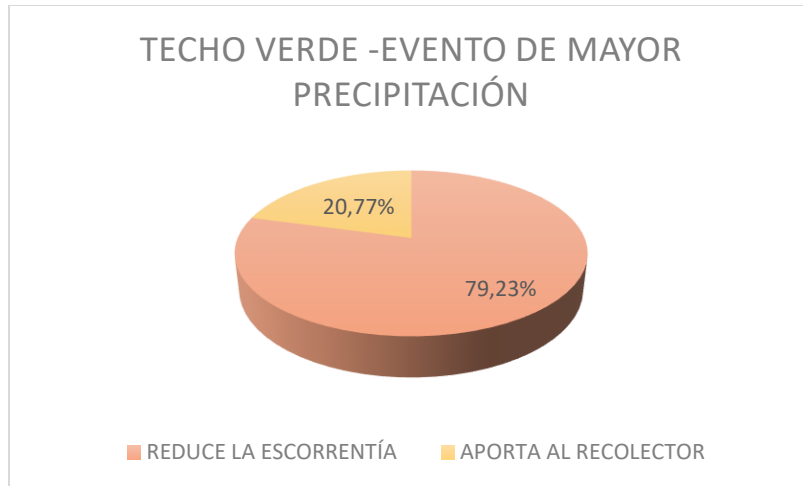


Figura 36 Gráfica de comparación de caudales entre un techo convencional y un techo verde

Fuente: Elaboración propia



*Figura 37 Porcentaje de caudal en un evento de mayor precipitación*

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en la figura 37, se tomó un evento de mayor precipitación que fue el 17 de octubre de 2020 y es evidente que el techo verde disminuye casi un 80% la cantidad de escorrentía superficial. Se tuvieron en cuenta los mismos días de lisímetro, es decir, la misma intensidad de precipitación para ambos casos.

#### **5.4 Viabilidad técnica**

Para el desarrollo del objetivo específico: análisis de viabilidad técnica de la implementación de cubiertas verdes extensivas sobre edificaciones considerando la gestión de escorrentía superficial, se realizó un análisis de viabilidad técnica de las cubiertas verdes según las dos empresas de construcción que tienen el servicio de cubiertas ajardinadas.

Con la lista de precios recogida con TOXEMENT, se realizó el presupuesto de la cubierta verde de 100 m<sup>2</sup> como se muestra en la siguiente figura 38, en donde incluye el sustrato óptimo que es la vermiculita + compost, además incluye las dos especies de plantas con mejor evapotranspiración e infiltración, las cuales son la Ixora y la Chlorophytum Comosum; adicional, en el presupuesto se colocó otra especie que es la Axonopus compressus, la cual es una especie de pasto y es una excelente especie para utilizarla como manejo de escorrentía.

PRESUPUESTO CUBIERTA VERDE					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	GEOTEXTIL NT	UNIDAD	4	\$ 260.000	\$ 1.040.000
2	MEMBRANA DE DRENAJE	M2	100	\$ 41.000	\$ 4.100.000
3	MEMBRANA DE IMPERMEABILIZACIÓN	UNIDAD	2,5	\$ 1.414.500	\$ 3.536.250
4	SUSTRATO				
4.1	Vermiculita	KG	342	\$ 10.000	\$ 3.420.000
4.2	Compost	BULTO	9	\$ 5.000	\$ 45.000
5	VEGETACIÓN				
5.1	Ixora	UNIDAD	238	\$ 4.000	\$ 952.000
5.2	Chlorophytum comosum	UNIDAD	230	\$ 5.000	\$ 1.150.000
5.3	Axonopus compressus	M2	64	\$ 9.000	\$ 576.000
<b>SUBTOTAL</b>					<b>\$ 8.676.250</b>
<b>AIU</b>		<b>10%</b>			<b>\$ 867.625</b>
<b>COSTO INDIRECTO</b>					<b>\$ 867.625</b>
<b>IVA sobre Utilidad</b>		<b>19%</b>			<b>\$ 1.648.488</b>
<b>TOTAL</b>					<b>\$ 11.192.363</b>

Figura 38 Presupuesto de cubierta verde con los valores de TOXEMENT

Fuente: elaboración propia.

Los precios de los que son el geotextil nt, la membrana de drenaje y la membrana de impermeabilización, se sacaron de la lista de precios que presenta la empresa TOXEMENT; los precios del sustrato y vegetación, se sacaron del VIVERO FOLLAJE SANTANDER, el cual se encuentra en el municipio de Piedecuesta y fue donde se compraron todos los implementos para la realización del lisímetro.

Con el presupuesto elaborado propiamente se obtiene que 1 m2 de cubierta verde tiene un valor de \$111,923.63 pesos colombianos; a esto se le adiciona el valor de m2 de una placa de concreto, \$132,444,66 pesos colombianos.

Con lo investigado anteriormente se realiza un esquema metodológico, utilizando el método de elección por ventaja CBA, por sus siglas en inglés Choosing by advantages; en donde se muestra a continuación en la figura 39, el análisis de viabilidad técnica de los techos verdes extensivos.

<b>METODOLOGÍA CHOOSING BY ADVANTAGES</b>			
<b>FACTOR CRITERIO</b>	<b>ALTERNATIVA 1: TECHO CONVENCIONAL</b>		<b>ALTERNATIVA 2: TECHO VERDE</b>
Disponibilidad de insumos para la construcción en la zona, incluyendo proveedores de sustrato y vegetación	ATR: Se consiguen fácilmente		ATR: Se consiguen
Mayor es mejor	VEN: En cualquier ferretería o constructora se pueden conseguir los insumo para la construcción	80	VEN: En constructoras o empresas que ofrezcan el servicio de infraestructura verde, como TOXEMENT, CASA AMBIENTE SAS; además más de 15 viveros en la zona donde se puede conseguir el sustrato y la vegetación.
Mano de obra calificada para la construcción y mantenimiento del proyecto	ATR: Se consiguen fácilmente		ATR: Se consiguen
Mayor es mejor	VEN: La mano de obra para las construcciones convencionales se consiguen con cualquier empresa de construcción o trabajo de obra	70	VEN: Es necesario personal capacitado para la instalación de cubiertas verdes, se pueden conseguir en las empresas dedicadas a la construcción de infraestructura verde
Potencial de innovación	ATR: La mayoría de edificaciones presentan este		ATR: Lleva 10 años en Colombia
Mayor es mejor	VEN:	0	VEN: A pesar que el primer techo verde se construyó en Suiza en 1914, en Alemania se puso de moda en 1960 (Shafique) y aquí en Colombia empezaron a implementar este sistema desde el 2010
Gestión y reducción de escorrentía superficial	ATR: Aporta casi el 100% de la capacidad del recolector		ATR: Reduce un 79,23% de escorrentía en un evento de mayor precipitación
Mayor es mejor	VEN:	0	VEN: Reduce la cantidad de escorrentía notoriamente, disminuyendo las infiltraciones a las edificaciones y las inundaciones en las vías
Mejora la calidad del aire	ATR: No aplica		ATR: La vegetación retiene las partículas de polvo
Mayor es mejor	VEN:	0	VEN: A medida que la vegetación va creciendo necesitan CO2, reteniendo así la contaminación y mejorando la calidad del aire
Reducción de ruido	ATR: No aplica		ATR: Aislamiento térmico mayor a los 10db
Mayor es mejor	VEN:	0	VEN: La vegetación y el sustrato propician una barrera protectora donde absorben y desvían el ruido (García y Vega)
Mejora la calidad del agua	ATR: No aplica		ATR: Retención de contaminantes del agua
Mayor es mejor	VEN:	0	VEN: Al retener el agua, el sustrato también retiene sus contaminantes, mejorando así la calidad de agua infiltrada
Reducción de energía y mejoramiento del clima en la estructura	ATR: No aplica		ATR: Adicionan resistencia térmica
Mayor es mejor	VEN:	0	VEN: La cubierta verde genera sombra evitando las radiaciones solares y generando enfriamiento en la infraestructura, lo que hace que no sea necesario un aire acondicionado y reduce los costos de energía
Reducción del efecto de isla de calor	ATR: No aplica		ATR: La vegetación absorbe el calor de la ciudad
Mayor es mejor	VEN:	0	VEN: Las especies absorben el calor y lo expulsan por medio de la evapotranspiración, reduciendo así el efecto de isla de calor
<b>TOTAL</b>	<b>150</b>		<b>310</b>

Figura 39 Metodología CBA

Fuente: elaboración propia

La metodología CBA trabajada en la figura 39, consiste en comparar 2 o más alternativas; en este caso nuestras alternativas son el techo convencional y el techo verde; además se necesitan un factores a evaluar, los cuales serían disponibilidad de insumos para la construcción en la zona, incluyendo proveedores de sustrato y vegetación, mano de obra calificada para la construcción y mantenimiento del proyecto, potencial de innovación, gestión y reducción de escorrentía superficial, mejora en la calidad del aire, reducción de ruido, mejora la calidad de agua lluvia, reducción de energía y mejoramiento del clima en la estructura y reducción del efecto de isla de calor; a los factores mencionados anteriormente, en cada alternativa se le coloca un atributo y a cada atributo se coloca una ventaja, cada ventaja tiene un criterio que en este caso es mayor es mejor y además a cada ventaja se le asigna un puntaje de importancia, este puntaje se muestra en la siguiente figura 40.

<b>IMPORTANCIA</b>	<b>VENTAJA</b>
100	Reduce la cantidad de escorrentía notoriamente, disminuyendo las infiltraciones a las edificaciones y las inundaciones en las vías
90	En cualquier ferretería o constructora se pueden conseguir los insumo para la construcción
80	La mano de obra para las construcciones convencionales se consiguen con cualquier empresa de construcción o trabajo de obra
70	Al retener el agua, el sustrato también retiene sus contaminantes, mejorando así la calidad de agua infiltrada
60	A medida que la vegetación va creciendo necesitan CO <sub>2</sub> , reteniendo así la contaminación y mejorando la calidad del aire
50	Las especies absorben el calor y lo expulsan por medio de la evapotranspiración, reduciendo así el efecto de isla de calor
40	A pesar que el primer techo verde se construyó en Suiza en 1914, en Alemania se puso de moda en 1960 (Shafique) y aquí en Colombia empezaron a implementar este sistema desde el 2010
30	
20	La cubierta verde genera sombra evitando las radiaciones solares y generando enfriamiento en la infraestructura, lo que hace que no sea necesario un aire acondicionado y reduce los costos de energía
10	La vegetación y el sustrato propician una barrera protectora donde absorben y desvían el ruido (García y Vega)
0	NO PRESENTA VENTAJAS

*Figura 40 Importancia de cada ventaja para la metodología CBA*

Fuente: elaboración propia

En la figura 40 se muestra la importancia de cada ventaja de 0 – 100, siendo 100 la ventaja más importante de cualquier alternativa y así sucesivamente según sea el caso. Para finalizar se suman todos los puntos de cada alternativa y quien tenga mayor puntaje es la más conviene.

## 6 CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos, teniendo en cuenta cada objetivo específico planteado, se puede concluir lo siguiente:

La determinación del tipo de sustrato y vegetación presente en un techo verde extensivo por medio de revisión bibliográfica y realizando un lisímetro para hallar la evapotranspiración y la infiltración experimental en el tipo de vegetación, se pudo evidenciar:

- En el momento de la realización del lisímetro, se concluyó que el mejor sustrato para las plantas según los propuestos seleccionados es el de 70% de Vermiculita y 30% de Compost. Comprobándose con el crecimiento de las plantas y por medio de las tablas del lisímetro.
- La *Ixora* con el sustrato de 80% Perlita y 20% Turba murió, ya que no se adaptó a este sustrato; en cambio, la *Ixora* con el sustrato de 70% Vermiculita y 30% Compost creció y se mostró más viva y llena de nutrientes.
- Entre más densidad presente un sustrato existe menor capilaridad del agua, esto quiere decir que la infiltración es menor.
- Las plantas más óptimas para la gestión de escorrentía superficial, coincidieron con el proyecto de grado de Yureima Quintero (QUINTERO FERNÁNDEZ & VALCARCEL CHAPARRO, 2020), las cuales fueron la *Ixora* y la *Clhoropythum comosum*.

La aplicación de los datos en un modelo hidrológico que establezca la relación entre flora/sustrato usando una herramienta que considere la dinámica del agua en una cubierta verde, se pudo evidenciar:

- El software Gifmod registró los resultados de evapotranspiración más bajos, esto se debe a que Gifmod tiene en cuenta la profundidad de los estratos y el tipo de suelo; además Gifmod trabaja con el método de FAO-56 Penman – Monteith y debido a la contingencia sanitaria que el país está enfrentando no se pudieron obtener estos datos, ya que son sacados de la estación meteorológica de la Universidad Pontificia Bolivariana y no estaba disponible.
- Como se muestra en la figura 20, el lisímetro presenta una mayor evapotranspiración que la arrojada en gifmod, esto puede ser porque el lisímetro fue un ensayo experimental manual y al manipular la taza donde se encuentra el volumen de agua infiltrada se pudieron presentar riegos durante el momento del peso, presentando así una diferencia notoria de evapotranspiración con respecto a gifmod.

La elaboración de una comparación entre una cubierta convencional y una cubierta verde extensiva a partir de un evento de mayor precipitación, mostrando los porcentajes de reducción de escorrentía superficial, se pudo evidenciar:

- En la comparación de caudales según el techo, se evidencia y se comprueba que construir un techo verde reduce notoriamente la escorrentía superficial, esto se debe al sustrato y vegetación que se utilizan según el clima de la zona; en el evento de mayor precipitación logró reducir la escorrentía un 79,17%.
- Construir un techo verde es más costoso que un techo convencional, ya que a la estructura normal del edificio deben sumarle \$111,923.63 por metro cuadrado; este precio varía dependiendo del tipo de vegetación y sustrato del techo que se desee construir.

La realización del análisis de viabilidad técnica de la implementación de cubiertas verdes extensivas sobre edificaciones considerando la gestión de escorrentía superficial, se pudo evidenciar:

- Un factor de viabilidad de una cubierta verde, es que entre menos infiltración se presente, menos agua llega al colector de aguas lluvias ayudando a reducir las inundaciones en las vías.

## Referencias

- Aguirre, D., Morera , C., & Torres, A. (2014). *MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE TECHOS VERDES PRODUCTIVOS*. BOGOTÁ DC: UNIVERSIDAD PONTIFICIA JAVERIANA.
- AYALA MARTÍNEZ, E., & VARGAS PÉREZ, J. (2014). *ESTUDIO HIDROLÓGICO, DE INUNDACIÓN Y EROSIÓN URBANIZACIÓN NUEVO AMANECER - MUNICIPIO DE PIEDECUESTA SANTANDER*. BUCARAMANGA: UNIVERSIDAD DE SANTANDER.
- BAQUERA CUADROS, E., & TAUSA GARCÍA, K. (2018). *PLAN DE NEGOCIO PARA LA CREACIÓN DE UNA EMPRESA DE PRODUCCIÓN DE ABONO A TRAVÉS DE DESECHOS ORGÁNICOS*. BOGOTÁ DC: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.
- BASRBARO, L., SOTO, S., SISARO, D., KARLANIAN, M., & STANCANELLI, S. (2017). *SUSTRATOS PARA TECHOS VERDES SUSTENTABLES (EXTENSIVOS)*. BUENOS AIRES.
- Berardi, U., Ghaffarian Hoseini, A., & Ghaffarian Hoseini, A. (2013). State of the art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Elseiver*, 1-18.
- Betancur Quiceno, A. M. (2017). *HACIA UNA PROPUESTA DE GESTIÓN AMBIENTAL URBANA: ALCANCES DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE, UN NUEVO PARADIGMA*. BOGOTÁ DC: UNIVERSIDAD PONTIFICIA JAVERIANA.
- Cascone, S. (2019). Diseño de techo verde: estado del arte en tecnología y materiales. *sustainability*.

CHIARITO, E., ZIMMERMANN, E., & MÉNDEZ ZACARÍAS, S. (s.f.). *METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA EN ÁREAS URBANIZADAS MEDIANTE TELEDETECCIÓN*. SANTA FE, ARGENTINA: UNIVERSIDAD DEL ROSARIO.

DEVELOPMENT, S. A. (s.f.).

ESCALANTE, D. J. (2011). *GUÍA DE TECHOS VERDES EN BOGOTÁ*. BOGOTÁ: BOGOTÁ POSITIVA.

GARCÍA COLLANTE, M., & VEGA PATERNINA, J. (2012). *TECHOS VERDES: ¿UNA HERRAMIENTA VIABLE PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL EN EL SECTOR HOTELERO DEL RODADERO, SANTA MARTA?* MEDELLÍN: GESTIÓN Y AMBIENTE.

GRIMOLDI, E. (2009). *DISEÑO Y APLICACIÓN DE TECHOS VERDES*. BUENOS AIRES: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES.

Hernández Bolívar, J. S., & Cucaita Melgarejo, C. A. (2020). *ANÁLISIS DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE EN EL SEPARADOR VIAL DEL TRAMO COMPRENDIDO DEL PK 81+690 AL PK 88+000 QUE CONECTA A PIEDECUESTA CON FLORIDABLANCA*. PIEDECUESTA: UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.

Herrera Hurtado, M. F. (2019). *MORFOLOGÍA URBANA Y CLIMA LOCAL: ALTERNATIVAS DE DISEÑO URBANO A PARTIR DE INFRAESTRUCTURA VERDE. CASO DE ESTUDIO: MEDELLÍN, COLOMBIA*. MEDELLÍN: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

León Fandiño, E. A. (2014). *EVALUACIÓN DE UNA CUBIERTA VERDE COMO SISTEMA DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE*. BOGOTÁ: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

LÓPEZ LÓPEZ, N., CALAZA MARTÍNEZ, P., PÁEZ ALBORÉS, R., & LÓPEZ FABAL, A. (s.f.). *COMPORTAMIENTO HÍDRICO DE SUSTRATOS EMPLEADOS EN CUBIERTAS AJARDINADAS*. CORUÑA: UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA.

MARÍN, M. H. (2013). *PLAN ESTRATÉGICO PARA EL APROVECHAMIENTO DEL COMPOST RESIDUAL PARA LA EMPRESA AGRÍCOLA DEL ALTO SAS, HACIENDO ÉNFASIS EN LOS ASPECTOS AMBIENTALES*. PEREIRA: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.

MASSOUDIEH, A., & AFLAKI, S. (2017). *USER'S MANUAL FOR GREEN INFRASTRUCTURE FLEXIBLE MODEL (GIFMOD)*.

MÉTODO DE LOS COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA. (s.f.).

PRODUCCIÓN DE SUSTRATOS PARA VIVEROS. (2002). COSTA RICA.

QUINTERO FERNÁNDEZ, A., & VALCARCEL CHAPARRO, J. (2020). *IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DEL USO DE TECHOS Y MUROS VERDES SOBRE EDIFICIOS EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA Y SU ÁREA METROPOLITANA*. BUCARAMANGA: UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.

Rodríguez Molano, L. I. (2016). *SISTEMAS DE CONTROL DE ESCORRENTÍA DE AGUAS LLUVIAS: TECHOS VERDES VS TANQUES DOMICILIARIOS DE*

*ALMACENAMIENTO PARA EL CONTROL DE LA ESCORRENTÍA PLUVIAL EN CIUDADES.* BOGOTÁ DC: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES.

SHAFIQUE MUHAMMAD, KIM, R., & RAFIQ, M. (2020). *GREEN ROOF BENEFICIOS, LAS OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS.* REPÚBLICA DE COREA: REVISIONES DE ENERGÍA RENOVABLE Y SOSTENIBLE.

SISTEMAS DE RECOLECCIÓN Y EVACUACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS Y AGUAS LLUVIAS. (2016). En *REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO - RAS.* COLOMBIA: MINVIVIENDA.

SOIL CONSTRAINTS AND LOW IMPACT DEVELOPMENT. (s.f.).

SOIL CONSTRAINTS AND LOW IMPACT DEVELOPMENT. (2020).

SOTO, S., BARBARO, L., COVIELLA, M., & STANCANELLI, S. (s.f.). *CATÁLOGO DE PLANTAS PARA TECHOS VERDES.* BUENOS AIRES: MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y PESCA.

Trapote Jaume, A., & Fernández Rodríguez, H. (2016). *Técnicas de drenaje urbano sostenible.* INSTITUTO UNIVERSITARIO DEL AGUA Y DE LAS CIENCIAS AMBIENTALES.

TRUJILLO TRUJILLO, F. (2016). *DESARROLLO DE SUSTRATOS PARA CUBIERTAS VERDES EN EL ÁREA DE BOGOTÁ.* BOGOTÁ DC: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES.

TRUJILLO TRUJILLO, F. (2016). *DESARROLLO DE SUSTRATOS PARA CUBIERTAS VERDES EN EL ÁREA DE BOGOTÁ*. BOGOTÁ DC: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES.

VÁSQUEZ LUNA, O. (2013). *EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE TIPOS DE SUSTRATO Y VEGETACIÓN EN EL COMPORTAMIENTO DE TECHOS VERDES Y AZULES*. BOGOTÁ DC: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES.

Villegas González, P. A., & Contreras Bejarano, O. (2019). *GREEN ROOFS FOR COMPREHENSIVE WATER MANAGEMENT: CASE STUDY IN CHAPINERO, COLOMBIA*. BOGOTÁ: INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA.

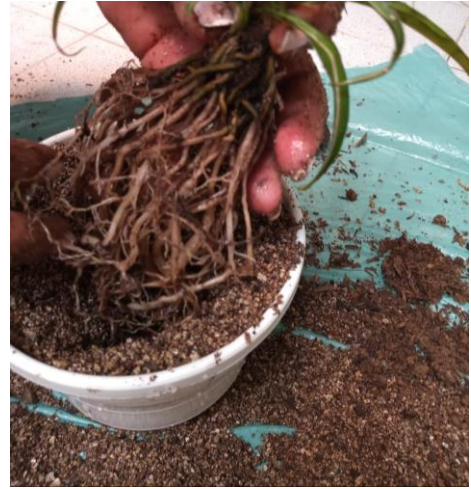
Zamata Quispe, C. (2019). *DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO ( $K_c$ ) DE LA PAPA (*Solanum tuberosum*) VARIEDAD UNICA UTILIZANDO LISÍMETRO DE DRENAJE EN LA MOLINA*. Lima: UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA .

## ANEXOS

### *Anexo A. Registro fotográfico de la realización del lisímetro*













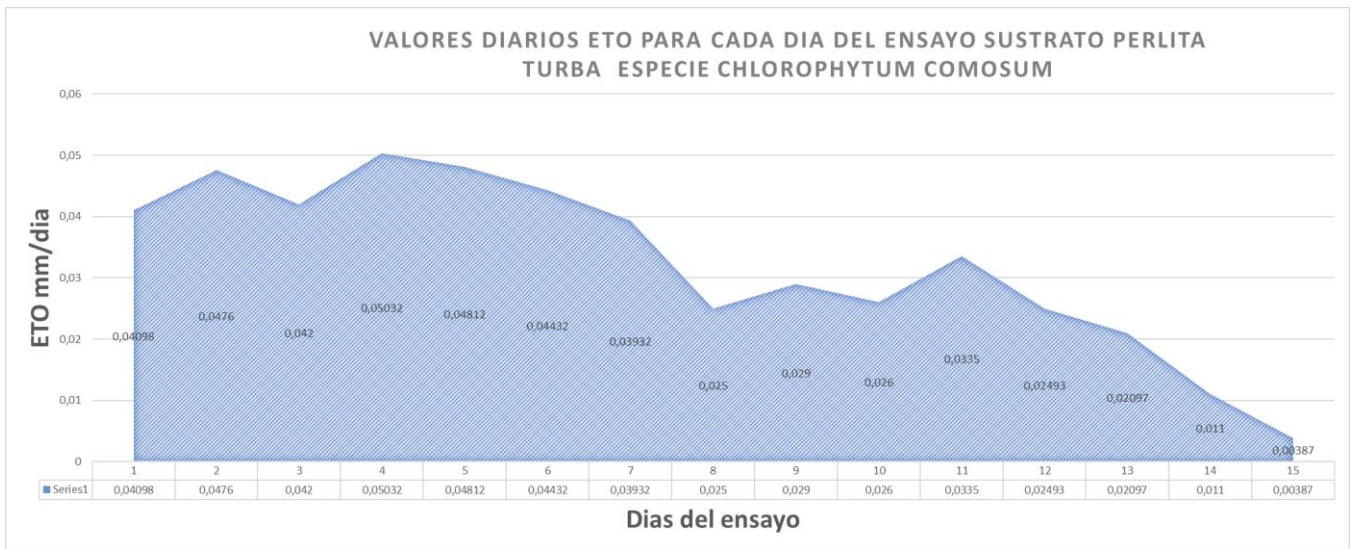
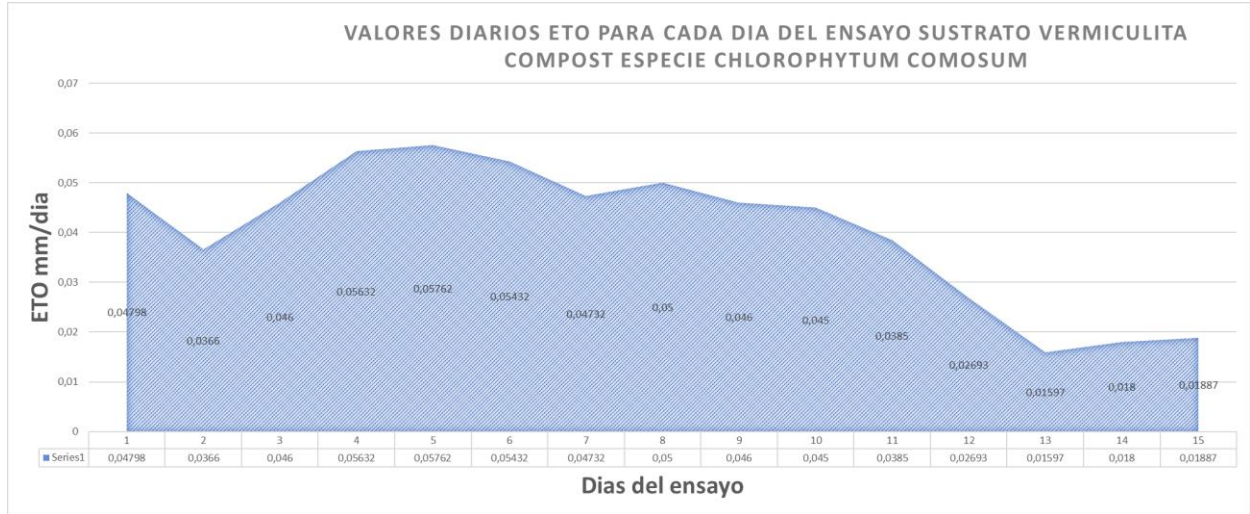
anexo B. Tablas y gráficas del lisímetro de la especie *CHLOROPHYTUM COMOSUM*

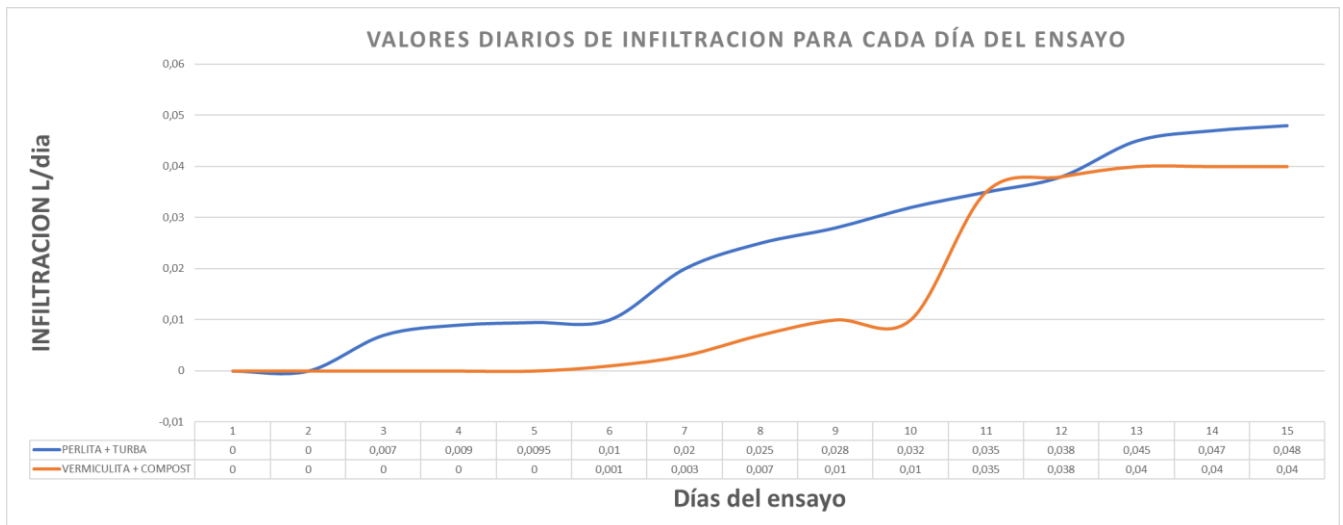
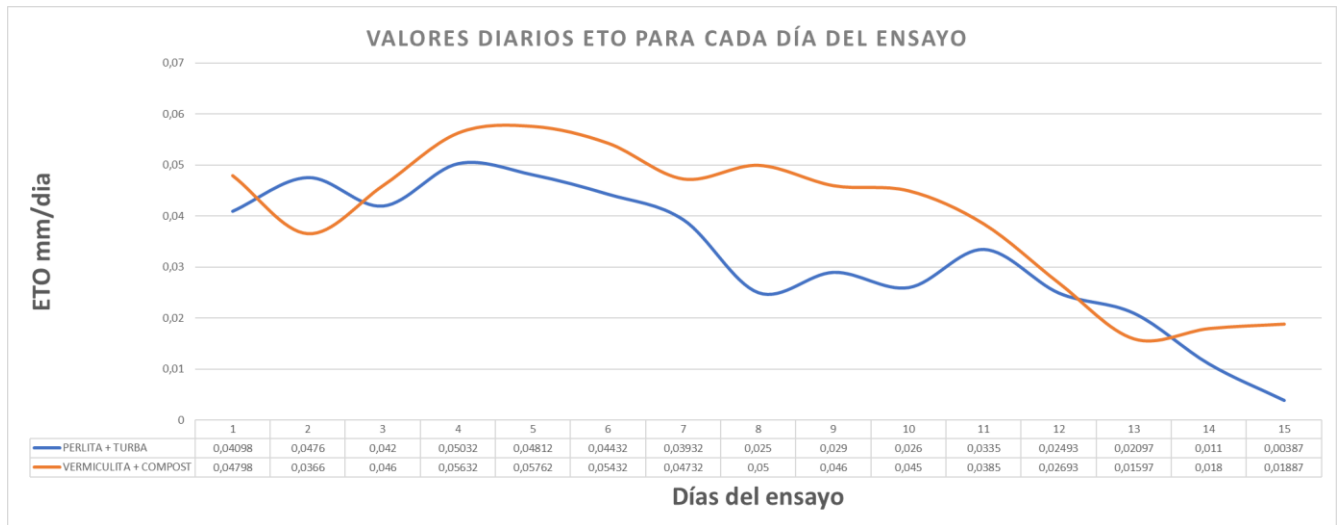
**ENSAYO LISIMETRO SUELO VERMICULITA Y ESPECIE CHLOROHYTUM COMOSUM**

Dia	Fecha	Hora	peso (suelo+planta) (kg)	cantidad de agua suministrada (L)	Hora	Peso (suelo+ planta+ agua ) (kg)	Evento de lluvia durante el ensayo (L)	Temperatura	Humedad	Precipitacion	Viento	Evaporacion+evapotranspiracion (L)	Infiltracion (L)
1	7/10/2020	8:00am	1,133	0,058	5:00pm	1,145	0,00198	25°c	86%	31%	13	0,04798	0
2	8/10/2020	8:00am	1,165	0,058	5:00pm	1,193	0,0066	24°c	86%	24%	11	0,0366	0
3	9/10/2020	8:00am	1,196	0,058	5:00pm	1,208	0	27°c	85%	18%	11	0,046	0
4	10/10/2020	8:00am	1,217	0,058	5:00pm	1,22	0,00132	24°c	91%	34%	13	0,05632	0
5	11/10/2020	8:00am	1,229	0,058	5:00pm	1,234	0,00462	25°c	90%	40%	13	0,05762	0
6	12/10/2020	8:00am	1,24	0,058	5:00pm	1,244	0,00132	24°c	85%	40%	13	0,05432	0,001
7	13/10/2020	8:00am	1,253	0,058	5:00pm	1,262	0,00132	24°c	90%	34%	11	0,04732	0,003
8	14/10/2020	8:00am	1,264	0,058	5:00pm	1,265	0	27°c	75%	20%	11	0,05	0,007
9	15/10/2020	8:00am	1,271	0,058	5:00pm	1,273	0	27°c	85%	24%	10	0,046	0,01
10	16/10/2020	8:00am	1,273	0,058	5:00pm	1,276	0	27°c	85%	18%	7	0,045	0,01
11	17/10/2020	8:00am	1,277	0,058	5:00pm	1,278	0,0165	24°c	90%	30%	13	0,0385	0,035
12	18/10/2020	8:00am	1,285	0,058	5:00pm	1,285	0,00693	24°c	85%	40%	10	0,02693	0,038
13	19/10/2020	8:00am	1,286	0,058	5:00pm	1,291	0,00297	24°c	90%	40%	11	0,01597	0,04
14	20/10/2020	8:00am	1,305	0,058	5:00pm	1,305	0	24°c	75%	20%	13	0,018	0,04
15	21/10/2020	8:00am	1,306	0,058	5:00pm	1,318	0,01287	24°c	90%	35%	11	0,01887	0,04

**ENSAYO LISIMETRO SUELO PERLITA Y ESPECIE CHLOROHYTUM COMOSUM**

Dia	Fecha	Hora	peso (suelo+planta) (kg)	cantidad de agua suministrada (L)	Hora	Peso (suelo+ planta+ agua ) (kg)	Evento de lluvia durante el ensayo (L)	Temperatura	Humedad	Precipitacion	Viento	Evaporacion+evapotranspiracion (L)	Infiltracion (L)
1	7/10/2020	8:00am	1,156	0,058	5:00pm	1,175	0,00198	25°c	86%	31%	13	0,04098	0
2	8/10/2020	8:00am	1,179	0,058	5:00pm	1,196	0,0066	24°c	86%	24%	11	0,0476	0
3	9/10/2020	8:00am	1,208	0,058	5:00pm	1,217	0	27°c	85%	18%	11	0,042	0,007
4	10/10/2020	8:00am	1,22	0,058	5:00pm	1,22	0,00132	24°c	91%	34%	13	0,05032	0,009
5	11/10/2020	8:00am	1,229	0,058	5:00pm	1,234	0,00462	25°c	90%	40%	13	0,04812	0,0095
6	12/10/2020	8:00am	1,235	0,058	5:00pm	1,24	0,00132	24°c	85%	40%	13	0,04432	0,01
7	13/10/2020	8:00am	1,244	0,058	5:00pm	1,244	0,00132	24°c	90%	34%	11	0,03932	0,02
8	14/10/2020	8:00am	1,245	0,058	5:00pm	1,253	0	27°c	75%	20%	11	0,025	0,025
9	15/10/2020	8:00am	1,262	0,058	5:00pm	1,263	0	27°c	85%	24%	10	0,029	0,028
10	16/10/2020	8:00am	1,264	0,058	5:00pm	1,264	0	27°c	85%	18%	7	0,026	0,032
11	17/10/2020	8:00am	1,265	0,058	5:00pm	1,271	0,0165	24°c	90%	30%	13	0,0335	0,035
12	18/10/2020	8:00am	1,271	0,058	5:00pm	1,273	0,00693	24°c	85%	40%	10	0,02493	0,038
13	19/10/2020	8:00am	1,273	0,058	5:00pm	1,273	0,00297	24°c	90%	40%	11	0,02097	0,04
14	20/10/2020	8:00am	1,278	0,058	5:00pm	1,285	0	24°c	75%	20%	13	0,011	0,04
15	21/10/2020	8:00am	1,286	0,058	5:00pm	1,305	0,01287	24°c	90%	35%	11	0,00387	0,048





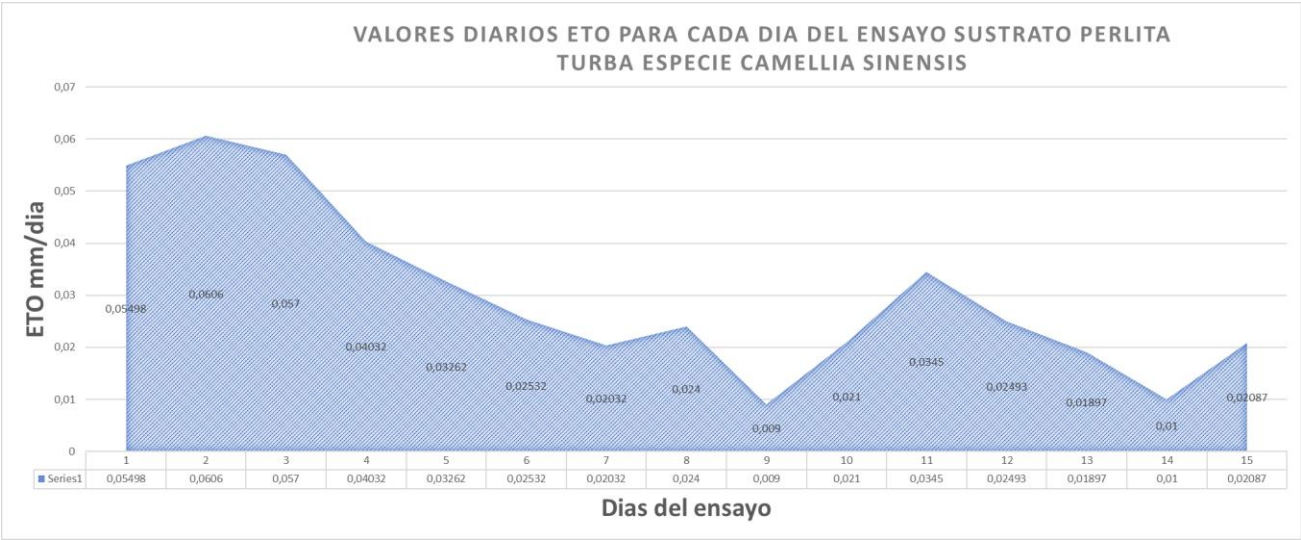
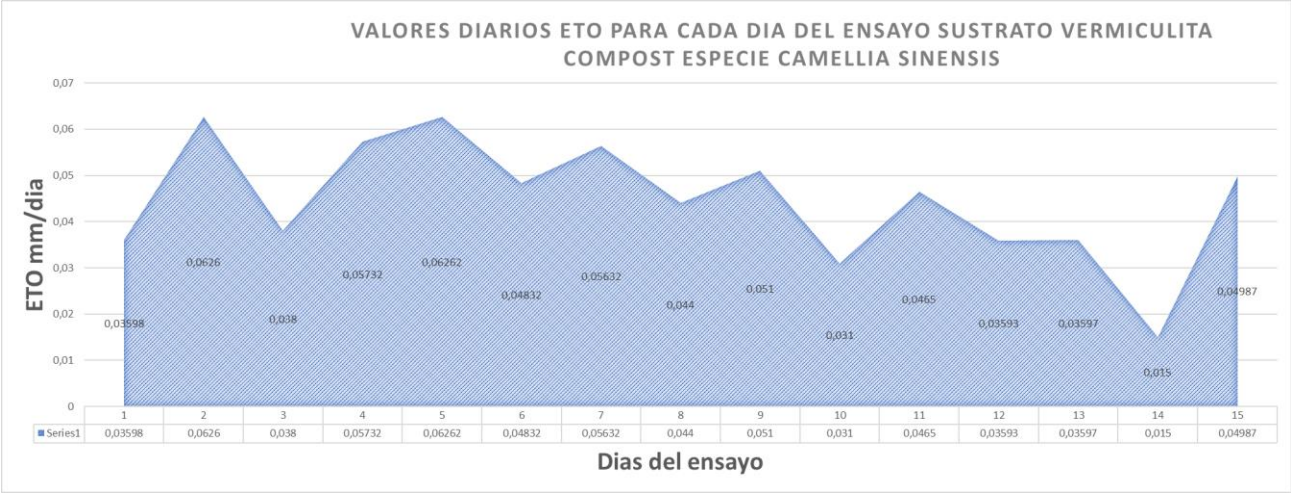
Anexo C. Tablas y gráficas de lisímetro de la especie *CAMELLIA SINENSIS*

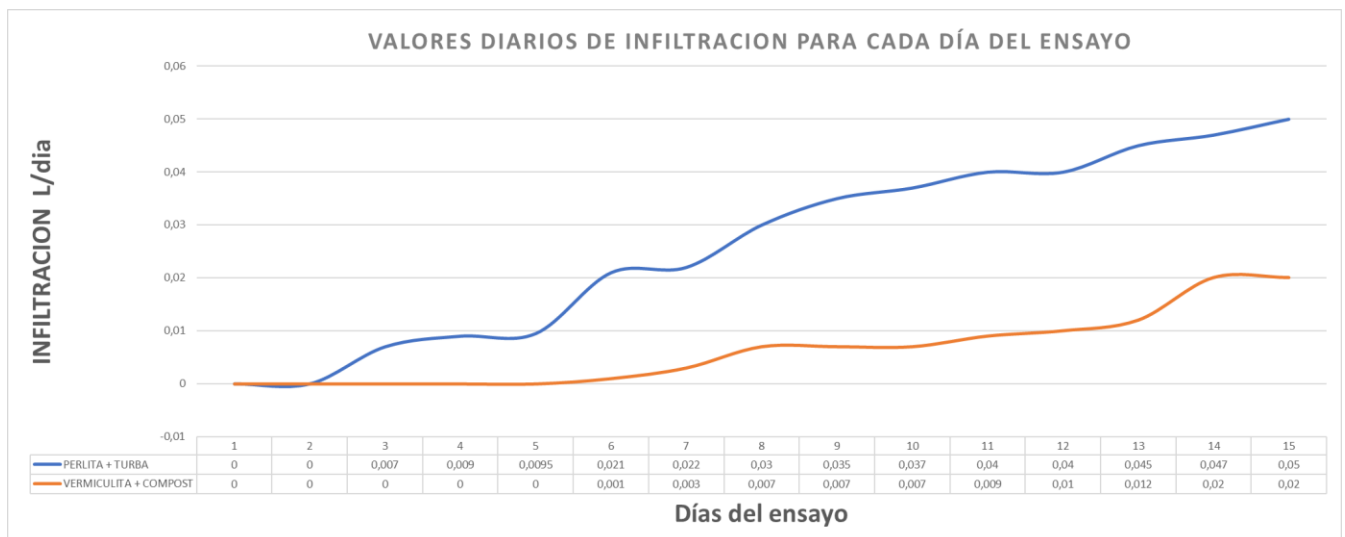
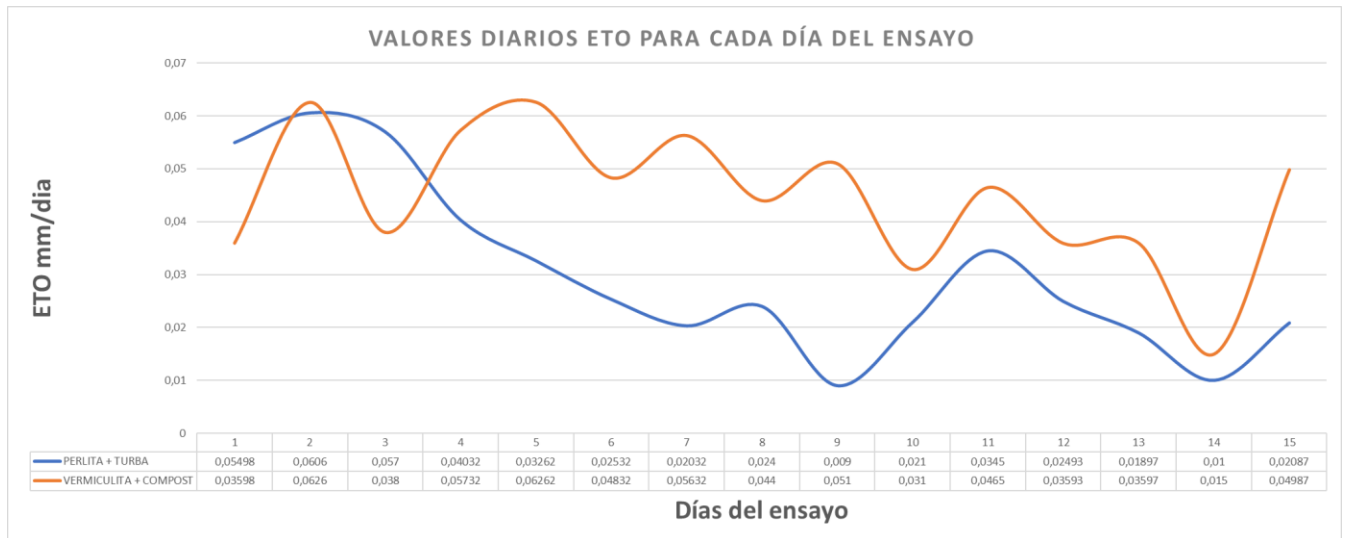
**ENSAYO LISIMETRO SUELO VERMICULITA Y ESPECIE CAMELLIA SINENSIS**

Día	Fecha	Hora	peso (suelo+planta) (kg)	cantidad de agua suministrada (L)	Hora	Peso (suelo+ planta+ agua ) (kg)	Evento de lluvia durante el ensayo (L)	Temperatura	Humedad	Precipitación	Viento	Evaporacion+evapotranspiracion (L)	Infiltracion (L)
1	7/10/2020	8:00am	0,818	0,058	5:00pm	0,842	0,00198	25°C	86%	31%	13	0,03598	0
2	8/10/2020	8:00am	0,868	0,058	5:00pm	0,87	0,0066	24°C	86%	24%	11	0,0626	0
3	9/10/2020	8:00am	0,89	0,058	5:00pm	0,91	0	27°C	85%	18%	11	0,038	0
4	10/10/2020	8:00am	0,939	0,058	5:00pm	0,941	0,00132	24°C	91%	34%	13	0,05732	0
5	11/10/2020	8:00am	0,944	0,058	5:00pm	0,944	0,00462	25°C	90%	40%	13	0,06262	0
6	12/10/2020	8:00am	0,945	0,058	5:00pm	0,955	0,00132	24°C	85%	40%	13	0,04832	0,001
7	13/10/2020	8:00am	0,959	0,058	5:00pm	0,959	0,00132	24°C	90%	34%	11	0,05632	0,003
8	14/10/2020	8:00am	0,974	0,058	5:00pm	0,981	0	27°C	75%	20%	11	0,044	0,007
9	15/10/2020	8:00am	0,983	0,058	5:00pm	0,983	0	27°C	85%	24%	10	0,051	0,007
10	16/10/2020	8:00am	0,986	0,058	5:00pm	1,006	0	27°C	85%	18%	7	0,031	0,007
11	17/10/2020	8:00am	1,006	0,058	5:00pm	1,025	0,0165	24°C	90%	30%	13	0,0465	0,009
12	18/10/2020	8:00am	1,025	0,058	5:00pm	1,044	0,00693	24°C	85%	40%	10	0,03593	0,01
13	19/10/2020	8:00am	1,044	0,058	5:00pm	1,057	0,00297	24°C	90%	40%	11	0,03597	0,012
14	20/10/2020	8:00am	1,079	0,058	5:00pm	1,102	0	24°C	75%	20%	13	0,015	0,02
15	21/10/2020	8:00am	1,102	0,058	5:00pm	1,103	0,01287	24°C	90%	35%	11	0,04987	0,02

**ENSAYO LISIMETRO SUELO PERLITA Y ESPECIE CAMELLIA SINENSIS**

Día	Fecha	Hora	peso (suelo+planta) (kg)	cantidad de agua suministrada (L)	Hora	Peso (suelo+ planta+ agua ) (kg)	Evento de lluvia durante el ensayo (L)	Temperatura	Humedad	Precipitación	Viento	Evaporacion+evapotranspiracion (L)	Infiltracion (L)
1	7/10/2020	8:00am	1,235	0,058	5:00pm	1,24	0,00198	25°C	86%	31%	13	0,05498	0
2	8/10/2020	8:00am	1,24	0,058	5:00pm	1,244	0,0066	24°C	86%	24%	11	0,0606	0
3	9/10/2020	8:00am	1,244	0,058	5:00pm	1,245	0	27°C	85%	18%	11	0,057	0
4	10/10/2020	8:00am	1,277	0,058	5:00pm	1,286	0,00132	24°C	91%	34%	13	0,04032	0,01
5	11/10/2020	8:00am	1,291	0,058	5:00pm	1,305	0,00462	25°C	90%	40%	13	0,03262	0,016
6	12/10/2020	8:00am	1,305	0,058	5:00pm	1,318	0,00132	24°C	85%	40%	13	0,02532	0,021
7	13/10/2020	8:00am	1,379	0,058	5:00pm	1,396	0,00132	24°C	90%	34%	11	0,02032	0,022
8	14/10/2020	8:00am	1,4	0,058	5:00pm	1,404	0	27°C	75%	20%	11	0,024	0,03
9	15/10/2020	8:00am	1,405	0,058	5:00pm	1,419	0	27°C	85%	24%	10	0,009	0,035
10	16/10/2020	8:00am	0	0,058	5:00pm	0	0	27°C	85%	18%	7	0,021	0,037
11	17/10/2020	8:00am	0	0,058	5:00pm	0	0,0165	24°C	90%	30%	13	0,0345	0,04
12	18/10/2020	8:00am	0	0,058	5:00pm	0	0,00693	24°C	85%	40%	10	0,02493	0,04
13	19/10/2020	8:00am	0	0,058	5:00pm	0	0,00297	24°C	90%	40%	11	0,01897	0,042
14	20/10/2020	8:00am	0	0,058	5:00pm	0	0	24°C	75%	20%	13	0,01	0,048
15	21/10/2020	8:00am	0	0,058	5:00pm	0	0,01287	24°C	90%	35%	11	0,02087	0,05

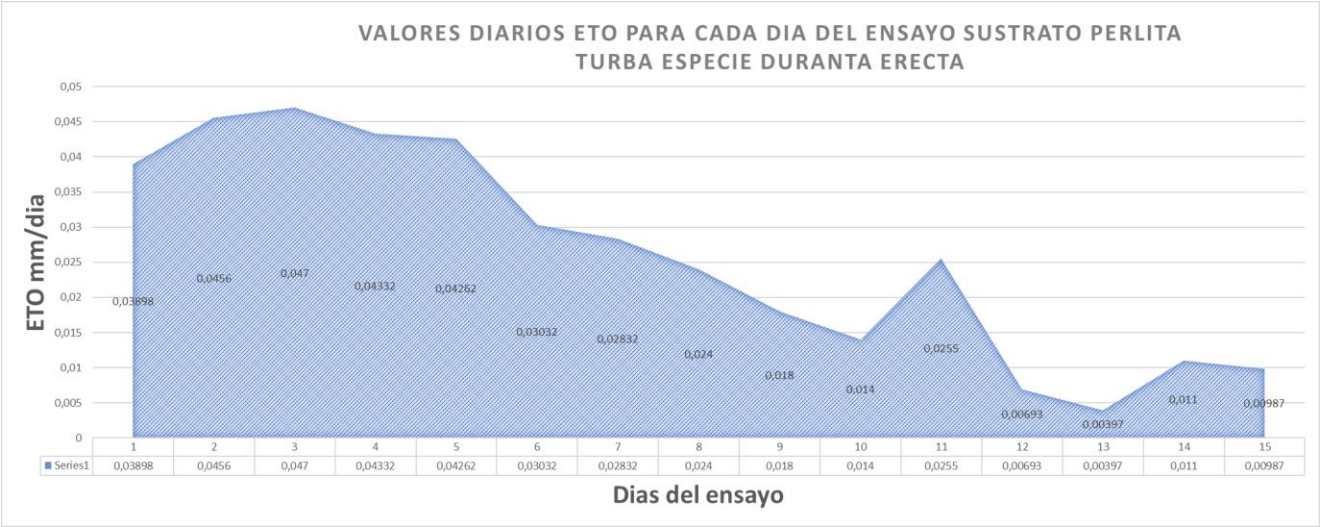
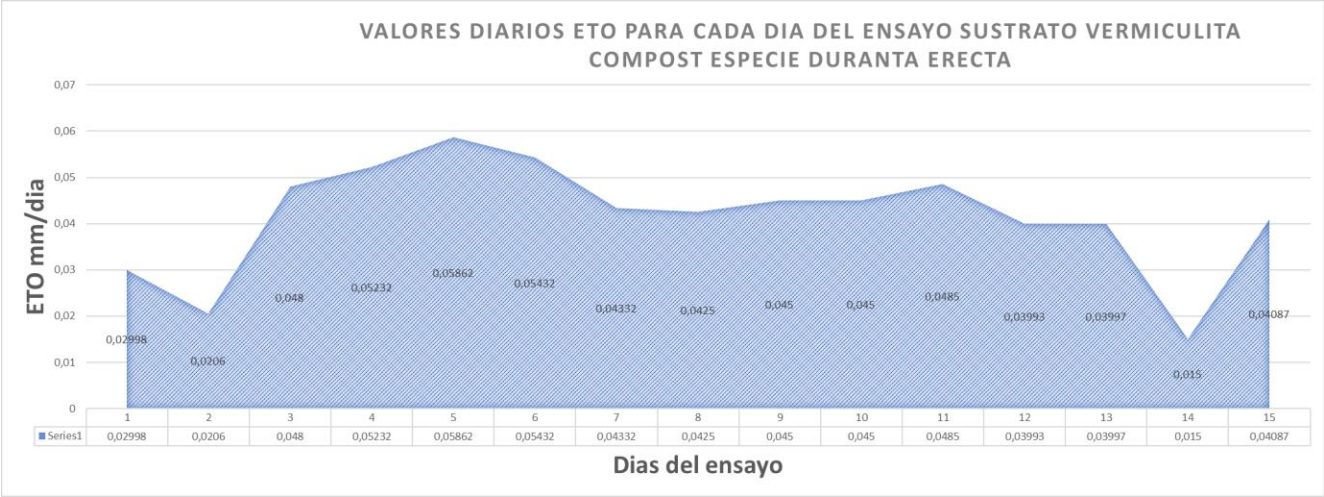


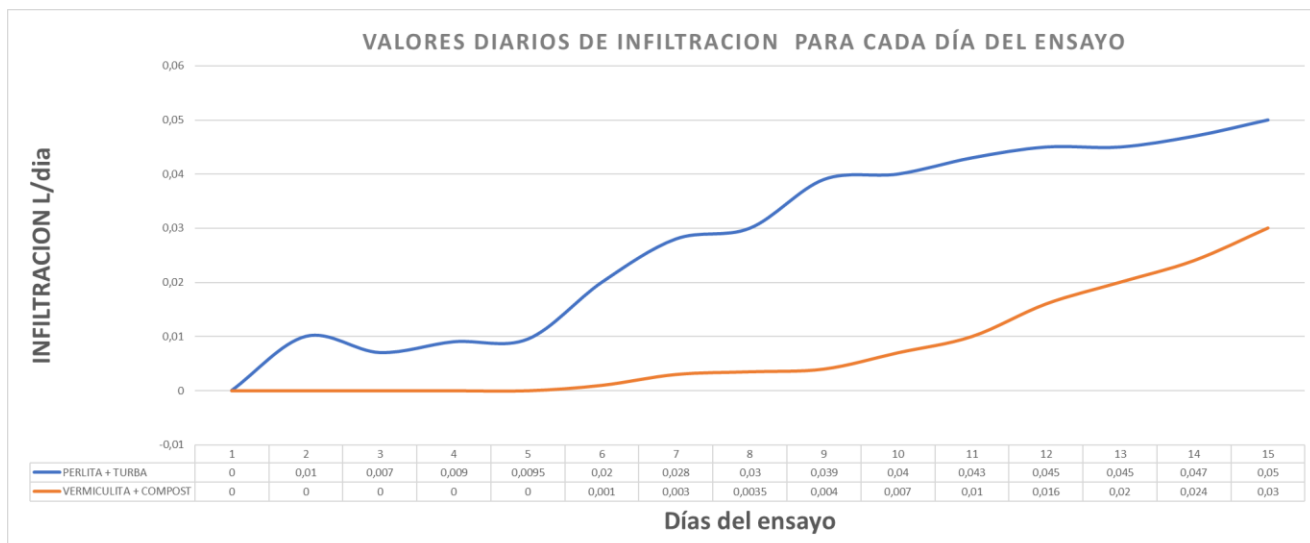
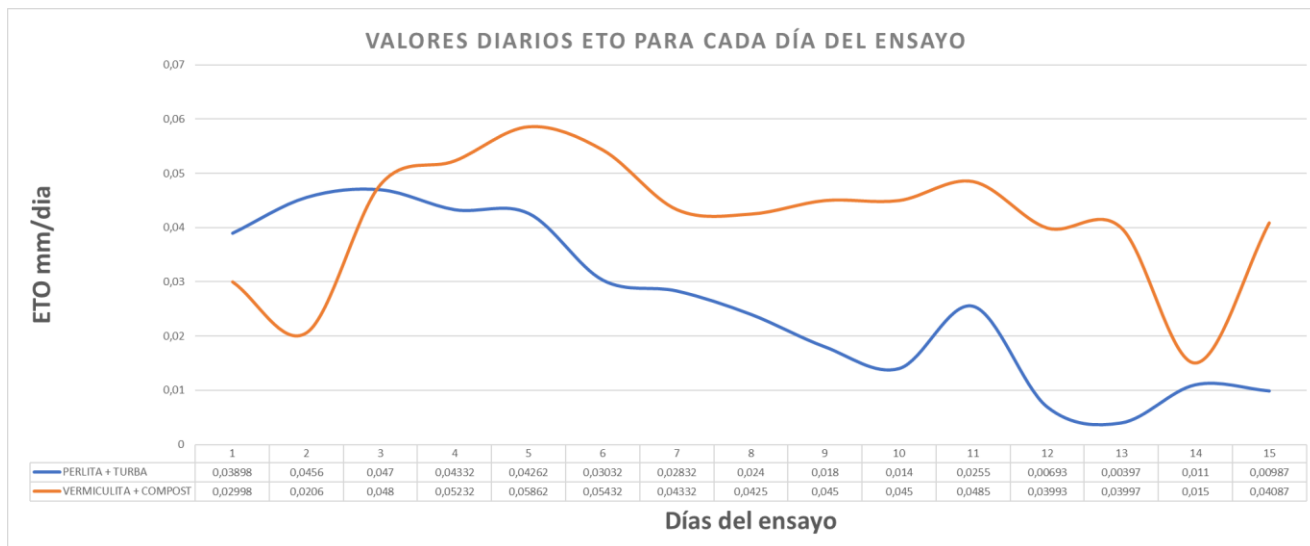


Anexo D. Tablas y gráficas de lisímetro de la especie DURANTA ERECTA

ENSAYO LISIMETRO SUELO VERMICULITA Y ESPECIE DURANTA ERECTA													
Dia	Fecha	Hora	peso (suelo+planta) (kg)	cantidad de agua suministrada (L)	Hora	Peso (suelo+ planta+ agua ) (kg)	Evento de lluvia durante el ensayo (L)	Temperatura	Humedad	Precipitacion	Viento	Evaporacion+evapotranspiracion (L)	Infiltracion (L)
1	7/10/2020	8:00am	0,86	0,058	5:00pm	0,89	0,00198	25°C	86%	31%	13	0,02998	0
2	8/10/2020	8:00am	0,9	0,058	5:00pm	0,944	0,0066	24°C	86%	24%	11	0,0206	0
3	9/10/2020	8:00am	0,945	0,058	5:00pm	0,955	0	27°C	85%	18%	11	0,048	0
4	10/10/2020	8:00am	0,976	0,058	5:00pm	0,983	0,00132	24°C	91%	34%	13	0,05232	0
5	11/10/2020	8:00am	0,983	0,058	5:00pm	0,987	0,00462	25°C	90%	40%	13	0,05862	0
6	12/10/2020	8:00am	1,002	0,058	5:00pm	1,006	0,00132	24°C	85%	40%	13	0,05432	0,001
7	13/10/2020	8:00am	1,012	0,058	5:00pm	1,025	0,00132	24°C	90%	34%	11	0,04332	0,003
8	14/10/2020	8:00am	1,032	0,058	5:00pm	1,044	0	27°C	75%	20%	11	0,0425	0,0035
9	15/10/2020	8:00am	1,048	0,058	5:00pm	1,057	0	27°C	85%	24%	10	0,045	0,004
10	16/10/2020	8:00am	1,069	0,058	5:00pm	1,075	0	27°C	85%	18%	7	0,045	0,007
11	17/10/2020	8:00am	1,075	0,058	5:00pm	1,091	0,0165	24°C	90%	30%	13	0,0485	0,01
12	18/10/2020	8:00am	1,091	0,058	5:00pm	1,1	0,00693	24°C	85%	40%	10	0,03993	0,016
13	19/10/2020	8:00am	1,102	0,058	5:00pm	1,103	0,00297	24°C	90%	40%	11	0,03997	0,02
14	20/10/2020	8:00am	1,103	0,058	5:00pm	1,122	0	24°C	75%	20%	13	0,015	0,024
15	21/10/2020	8:00am	1,133	0,058	5:00pm	1,133	0,01287	24°C	90%	35%	11	0,04087	0,03

ENSAYO LISIMETRO SUELO PERLITA Y ESPECIE DURANTA ERECTA													
Dia	Fecha	Hora	peso (suelo+planta) (kg)	cantidad de agua suministrada (L)	Hora	Peso (suelo+ planta+ agua ) (kg)	Evento de lluvia durante el ensayo (L)	Temperatura	Humedad	Precipitacion	Viento	Evaporacion+evapotranspiracion (L)	Infiltracion (L)
1	7/10/2020	8:00am	1,196	0,058	5:00pm	1,217	0,00198	25°C	86%	31%	13	0,03898	0
2	8/10/2020	8:00am	1,22	0,058	5:00pm	1,229	0,0066	24°C	86%	24%	11	0,0456	0,01
3	9/10/2020	8:00am	1,234	0,058	5:00pm	1,235	0	27°C	85%	18%	11	0,047	0,01
4	10/10/2020	8:00am	1,24	0,058	5:00pm	1,244	0,00132	24°C	91%	34%	13	0,04332	0,012
5	11/10/2020	8:00am	1,248	0,058	5:00pm	1,249	0,00462	25°C	90%	40%	13	0,04262	0,019
6	12/10/2020	8:00am	1,253	0,058	5:00pm	1,262	0,00132	24°C	85%	40%	13	0,03032	0,02
7	13/10/2020	8:00am	1,265	0,058	5:00pm	1,268	0,00132	24°C	90%	34%	11	0,02832	0,028
8	14/10/2020	8:00am	1,27	0,058	5:00pm	1,274	0	27°C	75%	20%	11	0,024	0,03
9	15/10/2020	8:00am	1,277	0,058	5:00pm	1,278	0	27°C	85%	24%	10	0,018	0,039
10	16/10/2020	8:00am	1,279	0,058	5:00pm	1,283	0	27°C	85%	18%	7	0,014	0,04
11	17/10/2020	8:00am	1,285	0,058	5:00pm	1,291	0,0165	24°C	90%	30%	13	0,0255	0,043
12	18/10/2020	8:00am	1,292	0,058	5:00pm	1,305	0,00693	24°C	85%	40%	10	0,00693	0,045
13	19/10/2020	8:00am	1,318	0,058	5:00pm	1,329	0,00297	24°C	90%	40%	11	0,00397	0,046
14	20/10/2020	8:00am	1,330	0,058	5:00pm	1,337	0	24°C	75%	20%	13	0,011	0,04
15	21/10/2020	8:00am	1,345	0,058	5:00pm	1,356	0,01287	24°C	90%	35%	11	0,00987	0,05





Anexo E. Tabla y gráficas de lisímetro de la especie IXORA

ENSAYO LISIMETRO SUELO VERMICULITA Y ESPECIE IXORA													
Dia	Fecha	Hora	peso (suelo+planta) (kg)	cantidad de agua suministrada (L)	Hora	Peso (suelo+ planta+ agua) (kg)	Evento de lluvia durante el ensayo (L)	Temperatura	Humedad	Precipitacion	Viento	Evaporacion+evapotranspiracion (L)	Infiltracion (L)
1	7/10/2020	8:00am	2,814	0,11	5:00pm	2,817	0,00198	25°c	86%	31%	13	0,10898	0
2	8/10/2020	8:00am	2,863	0,11	5:00pm	2,877	0,0066	24°c	86%	24%	11	0,1026	0
3	9/10/2020	8:00am	2,943	0,11	5:00pm	2,948	0	27°c	85%	18%	11	0,105	0
4	10/10/2020	8:00am	2,964	0,11	5:00pm	2,978	0,00132	24°c	91%	34%	13	0,09732	0
5	11/10/2020	8:00am	3,004	0,11	5:00pm	3,024	0,00462	25°c	90%	40%	13	0,09462	0
6	12/10/2020	8:00am	3,029	0,11	5:00pm	3,048	0,00132	24°c	85%	40%	13	0,08232	0,01
7	13/10/2020	8:00am	3,074	0,11	5:00pm	3,121	0,00132	24°c	90%	34%	11	0,05032	0,014
8	14/10/2020	8:00am	3,126	0,11	5:00pm	3,136	0	27°c	75%	20%	11	0,08	0,02
9	15/10/2020	8:00am	3,149	0,11	5:00pm	3,189	0	27°c	85%	24%	10	0,049	0,021
10	16/10/2020	8:00am	3,207	0,11	5:00pm	3,215	0	27°c	85%	18%	7	0,079	0,023
11	17/10/2020	8:00am	3,217	0,11	5:00pm	3,217	0,0165	24°c	90%	30%	13	0,0965	0,03
12	18/10/2020	8:00am	3,226	0,11	5:00pm	3,259	0,00693	24°c	85%	40%	10	0,04793	0,036
13	19/10/2020	8:00am	3,267	0,11	5:00pm	3,289	0,00297	24°c	90%	40%	11	0,05097	0,04
14	20/10/2020	8:00am	3,301	0,11	5:00pm	3,319	0	24°c	75%	20%	13	0,052	0,04
15	21/10/2020	8:00am	3,346	0,11	5:00pm	3,374	0,01287	24°c	90%	35%	11	0,05187	0,043

