

**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN MODELO DE TECHOS VERDES PARA LA
UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO, SEDE SUR - BOGOTÁ-.**

María Victoria Mendez Rozo

Universidad Antonio Nariño

Bogotá D.C.

Facultad De Ingeniería Ambiental

2020

**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN MODELO DE TECHOS VERDES PARA LA
UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO, SEDE SUR - BOGOTÁ-.**

María Victoria Mendez Rozo

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Ambiental

Director

Marcos Ramos

Ingeniero Ambiental

Especialista en Higiene, Seguridad y Salud En El Trabajo

Asesor

Iván Ávila León

Microbiólogo industrial

PhD en Tecnología Bioquímico Farmacéutica

Universidad Antonio Nariño

Bogotá D.C.

Facultad de Ingeniería Ambiental.

2020

DEDICATORIA

Dedico este logro de mi vida principalmente a Dios quien ha guiado mi camino todo este tiempo; a mis padres Miryam y Ricardo quienes han luchado por mí siempre, me han brindado su apoyo y todo su amor. A mis hermanos Mauricio, Isabel y Juan porque siempre estuvieron cuando los necesite. A mis sobrinos Felipe, Juan, Sara y Anita quienes representan un motor para mi vida y siempre me enseñan algo nuevo. A mis cuñados Francisco y Johana por su apoyo incondicional y a Lucas que ha permanecido y me ha apoyado con su fiel compañía todo este tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los tutores Marcos Ramos y Iván Ávila por su compromiso, por su dedicación, por sus palabras y el nivel de exigencia con el que permanecieron todo el tiempo.

A la Universidad Antonio Nariño por brindarme conocimientos para mi formación personal y académica.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	3
2. Definición Del Problema.....	5
2.1 Formulación Del Problema	5
3. Justificación.....	7
4. Objetivos	8
4.1 Objetivo General	8
4.2 Objetivos Específicos.....	8
5. Marco Conceptual	9
5.1 Componentes del Techo verde	9
5.2 Clasificación general de techos verdes	10
5.3 Clasificación de Bogotá referente a techos verdes.....	12
5.3.1 Clasificación primaria	12
5.3.2 Clasificación secundaria.....	13
5.4 Tecnología empleada para los techos verdes	15
5.5 Clasificación de plantas para techos verdes	18
5.6 Beneficios ambientales y para la estructura	18

5.7 Beneficios Ambientales Urbanos	21
5.8 Costos	23
6. Estado del arte	25
6.1 Comparación de comportamiento de las edificaciones estructuras con y sin techo verde.....	25
6.2 Nuevas tendencias en los sustratos para los techos verdes	27
7. Metodología	29
7.1 Fase 1. Recopilación de información para diagnóstico de la zona de estudio	29
7.2 Fase 2. Evaluación de viabilidad técnica y financiera	30
7.3 Fase 3. Determinación de la técnica más adecuada para su implementación	30
7.4 Fase 4. Procedimiento general para la implementación de la propuesta de diseño de modelo de techos verdes para la universidad Antonio Nariño Sede Sur	31
8. Resultados Y Discusión	33
8.1 Fase 1. Recopilación de información para diagnóstico de la zona de estudio	33
8.1.1 Diagnóstico Ambiental.....	33
8.2 Fase 2. Evaluación de viabilidad técnica y financiera	46
8.2.1 Criterios de diseño.....	46

8.2.2 Material y cantidad.....	48
8.2.3 Análisis costo beneficio	49
8.3 Fase 3. Determinación de la técnica más adecuada para su implementación	52
8.3.1 Selección de la propuesta de techo verde ambiental y económicamente hablando	52
8.3.2 Plano de la propuesta de diseño	57
8.4 Fase 4. Procedimiento general para llevar a cabo la propuesta de diseño de modelo de techos verdes para la universidad Antonio Nariño Sede Sur	59
8.4.1 Planeación	59
8.4.2 Preparativos.....	59
8.4.3 Implementación.....	61
8.4.4 Instalación	63
8.4.5 Seguimiento	65
8.4.6 Mantenimiento	65
8.4.7 Desmonte	66
9. Conclusiones	68
10. Recomendaciones.....	69

11. Referencias 70

Listado De Figuras

<i>Figura 1. Capas de techo verde</i>	10
<i>Figura 2. Sistema multicapa monolítico</i>	16
<i>Figura 3. Sistema multicapa elevado</i>	16
<i>Figura 4. Sistema tipo receptáculo</i>	17
<i>Figura 5. Sistema tipo monocapa</i>	17
<i>Figura 6. Metodología</i>	32
<i>Figura 7. Ubicación localidad Rafael Uribe Uribe</i>	34
<i>Figura 8. Representación gráfica del comportamiento promedio anual de los contaminantes A) Material particulado de 2.5 micras, B) Material particulado de 10 micras. C) Dióxido de nitrógeno, D) Ozono en la estación Tunal</i>	35
<i>Figura 9. Representación gráfica del comportamiento promedio anual de los contaminantes A) Dióxido de azufre, B) Monóxido de carbono en la estación Tunal</i>	37
<i>Figura 10. Representación gráfica del comportamiento promedio anual de los contaminantes A) Material particulado 2.5 micras, B) Material particulado 10 micras, C) Ozono, D) Dióxido de azufre en la estación San Cristóbal</i>	40
<i>Figura 11. Localización Universidad Antonio Nariño Sede Sur</i>	43
<i>Figura 12. Localización Universidad Antonio Nariño Sede Sur con identificación del comportamiento del ruido A) horario nocturno B) horario diurno</i>	44
<i>Figura 13. Plano de techo verde extensivo en 3D</i>	57
<i>Figura 14. Plano de techo verde extensivo 2D</i>	58
<i>Figura 15. Preparativos para un techo verde</i>	60
<i>Figura 16. Anclaje que da libertad de movimiento</i>	62

<i>Figura 17. Orden de las capas del sistema techo verde.</i>	64
<i>Figura 18. Etapa de seguimiento.</i>	65
<i>Figura 19. Mantenimiento de un techo verde.</i>	66
<i>Figura 20. Desmonte de un techo verde.</i>	67

Listado De Tablas

<i>Tabla 1. Selección del área de estudio</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 2. Tipo de techo verde con su característica correspondiente</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 3. Clasificación primaria y secundaria para techos verdes en la ciudad de Bogotá.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 4. Tecnología empleada en las estructuras de los techos verdes.</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 5. Identificación de vegetación a partir de sustrato.</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 6. Identificación numérica de los usos del suelo</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 7. Temperatura en la Universidad Antonio Nariño Sede Sur.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 8. Criterios de diseño de propuestas de techo verde.</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 9. Cantidad y material de construcción para propuesta de techo verde extensivo tipo ecológico autorregulado adaptado de empresa A.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 10. Cantidad y material de construcción para propuesta de techo verde intensivo tipo ajardinado adaptado de empresa B.</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 11. Análisis costo beneficio para Techos verdes extensivos.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 12. Asignación de valores a costos y beneficios para Techos verdes extensivos</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 13. Análisis costo beneficio para Techos verdes intensivos.</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 14. Asignación de valores a costos y beneficios para Techos verdes intensivos</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 15. Ficha técnica del proveedor del proyecto de techo verde.</i>	<i>61</i>

Resumen

Dentro de las condiciones ambientales que rodean el bloque 5 de Universidad Antonio Nariño (UAN) sede sur se encuentra la problemática del ruido, la cual excede los 65db permitidos establecidos en la resolución la resolución 0627 de 2006 expedida por Ministerio de Ambiente. El objetivo de esta investigación es realizar una propuesta de diseño de un modelo de techos verdes para la UAN sede sur, como alternativa para mitigar esta problemática. La metodología implementada consistió en recopilar información para generar un diagnóstico del lugar, adicionalmente se realizó una evaluación técnica para la construcción del techo verde, un análisis costo-beneficio y finalmente se desarrolló un procedimiento para la implementación de la propuesta. Se identificó que la técnica más adecuada de techo verde para la propuesta es un techo extensivo, de clasificación ecológica autorregulado, con una tecnología multicapa monolítica. A partir de la aplicación del enfoque utilizado para este proyecto y siguiendo los lineamientos utilizados en la literatura, se logró considerar una propuesta de techo verde extensivo para la Universidad Antonio Nariño Sede Sur la cual mitiga la problemática de ruido y genera beneficios adicionales como manejo de temperatura, mejora en la calidad del aire, manejo del recurso hídrico, posibles ahorros energéticos, certificaciones por construcciones sostenibles, generación de bienestar para la comunidad entre otros.

Palabras clave: *Ruido, Techo Verde Extensivo, Ecológico Autorregulado, Multicapa Monolítica.*

Abstract

Surrounds block 5 of south headquarters Antonio Nariño University (UAN) is the problem of noise. It exceeds the 65db permitted established in resolution 0627 of 2006 issued by the Ministry of Environment. So, the objective of this research is to make a design proposal for a green roof model for those facilities as an alternative to mitigate this problem. The methodology consists of gathering information to generate a diagnosis of the place. Firstly, a technical evaluation for the green roof construction and a cost-benefit analysis is made. Secondly, a procedure is developed for the implementation of the proposal. It has been identified that the most suitable green roof technique is an extensive and self-regulated ecological classification roof, with a monolithic multilayer technology. From the application of the approach used for this project and following the guidelines used in the literature, it is achieved to consider an extensive green roof proposal for south headquarters Antonio Nariño University which mitigates the problem of noise and generates additional benefits such as temperature management, improvement in air quality, water resource management, potential energy savings, certifications for sustainable construction, generation of well-being for the community, among others.

Key Words: *Noise, Extensive Green Roof, Self-Regulated Ecological, Monolithic Multilayer Technology.*

1. Introducción

Los techos verdes son construcciones horizontales compuestas de vegetación, este sistema se coloca sobre la superficie de los edificios. Estas estructuras traen consigo beneficios ambientales como la reducción del ruido, manejo de la isla de calor, administración del recurso hídrico, ahorro energético, bienestar para la salud entre otros.

Los techos verdes tienen varias clasificaciones, de las más conocidas a nivel mundial se encuentran: extensivo, semi intensivo e intensivo. A nivel Bogotá, estos se clasifican por rasgos cómo: la **tecnología empleada** esto hace referencia a como se va a hacer la instalación del techo verde, la **clasificación primaria** la cuál especifica el tipo de techo a partir del sustrato y la **clasificación secundaria** donde se categoriza por el peso y la altura de la vegetación.

El fundamento de este trabajo es identificar cual es el estado en que se encuentra el área de estudio, es decir la Universidad Antonio Nariño sede Sur y a partir de un diagnóstico poder identificar cuál propuesta de techo verde es la más adecuada para el bloque 5 de la UAN.

En este trabajo se encontró que la propuesta que más se ajustaba a las necesidades de la UAN era un techo verde extensivo de clasificación ecológica autorregulado con una tecnología multicapa monolítica, ya que adicional a su capacidad de mitigar la problemática de ruido presente en el bloque 5, puede generar ciertos beneficios como por ejemplo la mejora en la calidad del aire, el manejo de la temperatura, reconocimientos por edificaciones sostenibles entre otros. Se encontró que los techos verdes extensivos generan más beneficios con menor inversión, esto se determinó a partir del análisis costo beneficio y de los precios que ofrecieron tanto la literatura como las empresas A y B. En el procedimiento para la implementación de la propuesta se pueden encontrar las generalidades de este proyecto.

Este proyecto se convierte en una herramienta inicial de lo que podría ser una propuesta sostenible que sirva para mitigar los impactos ambientales que se evidencian hoy en día y los que llegaran con el pasar del tiempo.

2. Definición Del Problema

En este apartado se presenta cómo es el surgimiento de esta investigación desde el análisis de la problemática la cual se va a estudiar a continuación.

2.1 Formulación Del Problema

La ubicación del proyecto se estipula para el bloque 5 de la Universidad Antonio Nariño, en esta área en el horario diurno de clase es donde mayor se sienten los impactos generados por los espacios aledaños a la zona de estudio. Además de ello se seleccionó a partir del criterio del área , según la guía de techos verdes del 2011 se recomienda que se desarrollen este tipo de proyectos en espacios mayores a los 100 m², por ende se evaluaron tres posibles ubicaciones y a partir de la herramienta Google Earth se determinó el dato correspondiente al área aproximada, esta información es presentada en la tabla 1, en ella se evidencia que el bloque 5 cuenta con mayor superficie respecto a las otras analizadas; una de las problemáticas que se presenta es el ruido, ya que la localidad Rafael Uribe Uribe ocupa uno de los lugares más ruidosos de la capital: según la SDA los decibeles están entre los 60 y 75(SDA, 2012). En general el clima de Bogotá es muy variado, hay momentos de altas y bajas temperaturas, estas son influenciadas por los eventos climáticos relacionados con los ciclos “ del Niño y de la Niña”, en los días soleados la temperatura puede llegar hasta los 23°C (Ramírez, 2017). La ubicación de la universidad es cercana a la avenida Caracas y a la avenida Primero de mayo donde se encuentra la presencia del Transmilenio, buses del Sitp y carros particulares, lo que permite identificar el exceso de material particulado en el aire por la presencia de las fuentes móviles de contaminación mencionadas. Adicionalmente a esto se cuentan con pocas zonas verdes a los alrededores de la universidad.

Por ello se decide proponer un techo verde como plan inicial, para poder empezar a mitigar impactos ambientales, principalmente la vegetación de estas estructuras actúa e influencia en el comportamiento del entorno de los edificios, de manera que sus beneficios se pueden identificar en determinado período de tiempo y a medida del transcurso del mismo, de esta manera se puede generar una solución sostenible, que puede llegar a beneficiar tanto a la universidad como a la comunidad aledaña de la misma.

Pregunta de investigación: ¿Cómo se podría identificar la ganancia y efectos con la puesta en marcha de un techo verde en la Universidad Antonio Nariño mediante el estudio de viabilidad referente a su construcción y su implementación?

Tabla 1.

Selección del área de estudio

Ubicación	Área aproximada en m²
Bloque 5	400
Bloque 8	350
Bloque 2	356

Fuente: *Google Earth (2020)*.

3. Justificación

Para mitigar los impactos causados por la urbanización, se generan las cubiertas verdes con la finalidad de conectar las urbanizaciones con la naturaleza, ofreciendo diversos beneficios los cuales ayudan a optimizar el entorno y la condición de vida de las comunidades (Superintendencia De Industria Y Comercio, 2014).

La cubierta verde contribuye beneficiosamente en la calidad del aire, en gran parte remueven contaminantes presentes en la atmósfera de las zonas urbanas, retiene grandes niveles de humedad de la ciudad, disminuye el consumo energético por el efecto aislamiento que presenta, absorbe el ruido, disminuye la ola de calor que es perceptible en las urbanizaciones, aumenta el valor comercial de las propiedades que cuentan con estas estructuras, disminuye la cantidad de agua de escorrentía, entre otros (Ávila Marchena, 2012).

El propósito de esta investigación es demostrar de manera cualitativa los beneficios que se podrían generar en la universidad Antonio Nariño, si se optara por la aplicación de las cubiertas verdes en la universidad, partiendo que esta propuesta es sólo para un bloque de la universidad, posteriores investigaciones podrían analizar cómo sería el beneficio de aplicarse el proyecto para toda la universidad.

Además de los beneficios y la capacidad de mitigar impactos anteriormente mencionados, si se llega a implementar, se puede generar interés por parte de la comunidad haciendo que se implemente esta tecnología en sus hogares.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

- Realizar una propuesta de diseño de un modelo de techos verdes para la Universidad Antonio Nariño, Sede Sur - Bogotá-

4.2 Objetivos Específicos

- Describir las condiciones ambientales en las que se encuentra la Universidad Antonio Nariño Sede Sur
- Evaluar la viabilidad técnica y financiera de su posible construcción en la UAN
- Determinar el método más apropiado de diseño para su implementación y analizarla

5. Marco Conceptual

Un Techo verde se puede identificar como una estructura plana o vertical sobre la cual se encuentra una superficie cubierta de material vegetal, en esta se combinan varios factores como la estructura o el bien a tratar, el tipo de vegetación, la técnica de mantenimiento así mismo de desarrollo y la variación meteorológica y ambiental que se pueda presentar(Nieto Escalante, 2011).

5.1 Componentes del Techo verde

En la figura 1 se pueden evidenciar los componentes de la estructura de un techo verde, en orden descendente se encuentra: **la vegetación** y **el sustrato** los cuales son parte esencial de la cubierta debido a que en ellos se soporta la vida de la estructura , luego se encuentra **la capa fieltro** que cumple la función de filtrar el agua que entra al sistema , posteriormente se encuentra **la placa de drenaje** que cumple el papel de drenar el agua que entra en la estructura a partir de la capa fieltro mencionada con anterioridad, **la capa de impermeabilización** y **membrana anti raíz** son componentes que generan estabilidad a la estructura, permitiendo que las raíces del material vegetal no lleguen a afectar la estructura y finalmente se encuentra **la cubierta** donde sobre ella se posa toda la estructura (García Buitrago, 2014).

Figura 1.

Capas de techo verde



Fuente: *García Buitrago (2014).*

5.2 Clasificación general de techos verdes

En un contexto internacional, Europa ha emitido directrices para su estructura, diseño y mantenimiento (Catalano, Laudicina, Badalucca, & Guarino, 2018) gracias a ello se ha estructurado la clasificación que se evidencia en la tabla 2.

Tabla 2.

Tipo de techo verde con su característica correspondiente

Tipo de techo verde	Característica
Intensivos	Su clasificación es a partir del grosor del sustrato (>30,48cm), usan diferentes tipos de plantas, tienen mayor retención de agua, son más costosos para su construcción y su mantenimiento (poda, riego y

fertilización), de ahí que por la variedad de plantas con las que puede trabajar la estructura debe tener alta capacidad de soporte en peso.

Semi-intensivos Su clasificación es a partir del grosor del sustrato (15.24 a 30.48cm), este es moderado, su vegetación son árboles, plantas y hierba pequeña, se requiere constante mantenimiento así las características de este son estables, en efecto si se quieren obtener altos rendimientos se generan más costos.

Extensivos de un solo curso Su clasificación esa partir del grosor del sustrato (7.62 a 10.46 cm), la capa de vegetación usa generalmente Sedum, usualmente no requiere riego y es de bajo mantenimiento, estos techos son livianos y perfectos cuando el factor de peso del edificio es limitante, además sus costos son bajos en comparación con las clases de techos mencionados con anterioridad.

Extensivo de múltiples cursos Su clasificación es en función del grosor del sustrato (10.16 a 15.24 cm), es muy liviano por consiguiente es uno de los más usados.

Fuente: *Shafique, Kim, & Rafiq (2018)*.

5.3 Clasificación de Bogotá referente a techos verdes

En la guía expedida por la Secretaria Distrital de Medio Ambiente de Bogotá se evidencia una clasificación primaria y una secundaria de techos verdes, las cuales serán tratadas a continuación (Nieto Escalante, 2011).

5.3.1 Clasificación primaria

Para comenzar se tienen los **techos verdes autorregulados**: este es un techo básico que cumple sus funciones a partir de mínimas prestaciones referentes a insumos, costos y la masa de la cobertura vegetal, por consiguiente, este sistema no está diseñado para ser transitable, exceptuando las labores de mantenimiento; en efecto, es importante aclarar que la estructura debe ser ligera, por tanto, se debe identificar la vegetación más acorde para el mismo. A continuación se encuentran los **techos verdes ajardinados**: estos están diseñados para generar una zona asequible, en la cual se puedan apreciar las especies vegetales presentes, es por ello que sus componentes deben ser elegidos de manera más rigurosa para complementar el paisaje; sus condiciones estructurales requieren mayor profundidad para su crecimiento y un mantenimiento más constante (Nieto Escalante, 2011).

Por su parte, los **techos verdes ecológicos especializados**: requieren mantener unas condiciones ambientales específicas, para permitir el desarrollo adecuado de fauna y flora del sitio en específico, ante todo es importante aclarar que estos techos son designados por entidades como el Jardín Botánico, la Secretaría Distrital De Medio Ambiente o la Secretaría Distrital de Planeación y estas estructuras requieren de mayor cuidado y seguimiento. Finalmente se encuentran los **techos huerta**: la finalidad de esta estructura es prestar un servicio adicional a los bienes asociados que generan los techos verdes, este servicio hace referencia a la agricultura, su

construcción es más exhaustiva, debido a que debe cumplir con las condiciones necesarias para que los cultivos crezcan de manera adecuada, por esta razón esta estructura debe ser avalada por el Jardín Botánico (Nieto Escalante, 2011).

5.3.2 Clasificación secundaria

En primer lugar, se encuentran los **techos verdes livianos**, estos reducen de manera importante su cantidad total en estado de saturación. A continuación, están los **techos verdes moderados**, los cuales hacen referencia a una solidez media por consiguiente se hace uso de elementos y técnicas tradicionales. Por último los **techos verdes robustos**, tienen mayor pesantez que los techos verdes moderados (Nieto Escalante, 2011).

En la tabla 3 se pueden observar las características más relevantes de la clasificación de techos verdes.

Tabla 3.

Clasificación primaria y secundaria para techos verdes en la ciudad de Bogotá

CLASIFICACIÓN PRIMARIA	Profundidad del Sustrato(mm)	Clasificación Secundaria					
		Liviano		Moderado		Robusto	
		Peso en estado saturado (kg/m ²)	Altura máx. de cobertura vegetal (cm)	Peso en estado saturado (kg/m ²)	Altura máx. de cobertura vegetal (cm)	Peso en estado saturado (kg/m ²)	Altura máx. de cobertura vegetal (cm)
Techo Verde Ecológico O Autorregulado	20-120	<80	<20	80-120	<50	120-150	<50
Techo Verde Ajardinado	1200-15000	<150	<50	150-200	<200	>250	sin limite
Techo Verde Ecológico Especial	no especifica	<200	<50	200-300	<150	300-450	<200
Techo Huerta	no especifica	<150	<50	150-250	<100	250-350	<150

Fuente: *Romero Correa (2013).*

5.4 Tecnología empleada para los techos verdes

Existen diferentes tecnologías para sobreponer la vegetación en las estructuras, actualmente se encuentran en proceso de desarrollo nuevas técnicas y avances, por ahora se detallan las que se encuentran actualmente en la tabla 4. Estas tecnologías se visualizan mejor en las figuras 2, 3, 4 y 5.

Tabla 4.

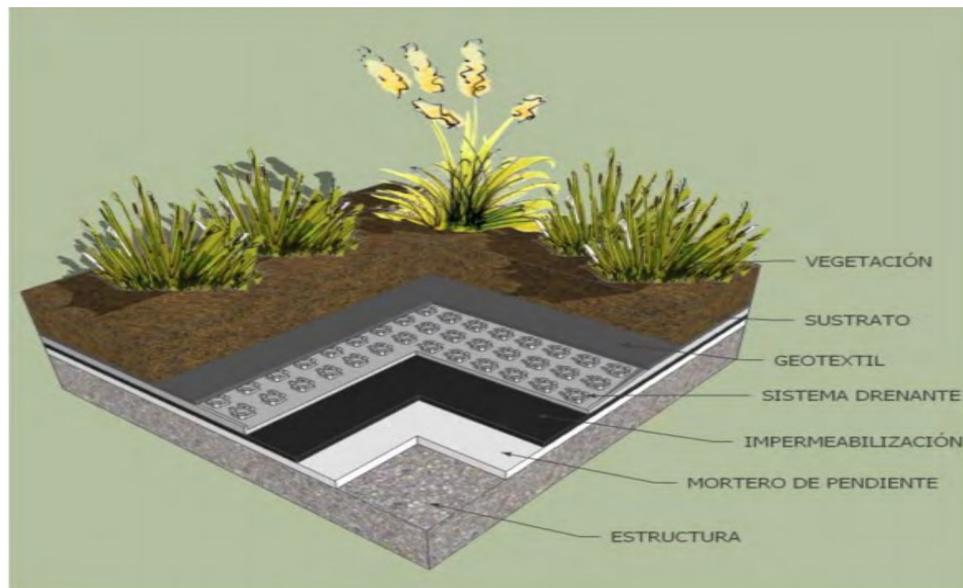
Tecnología empleada en las estructuras de los techos verdes.

Multicapa monolíticos	El techo verde y la cubierta del edificio se comportan como una sola estructura.
Multicapa elevados	Consiste en que las capas se ubican sobre pequeñas bases, por esta razón, se evidencia un espacio entre la capa y la zona de impermeabilización.
Receptáculo	Consiste en compartimientos en los cuales se organiza de manera individual el sustrato y el material vegetal.
Monocapa	Hace referencia a la mezcla entre una alfombra en la cual de manera posterior se ha sembrado en esta una cobertura vegetal y se une de manera sincrónica con la estructura impermeabilizada.

Fuente: Nieto Escalante (2011).

Figura 2.

Sistema multicapa monolítico



Fuente: Nieto Escalante (2011).

Figura 3.

Sistema multicapa elevado



Fuente: Nieto Escalante (2011).

Figura 4.

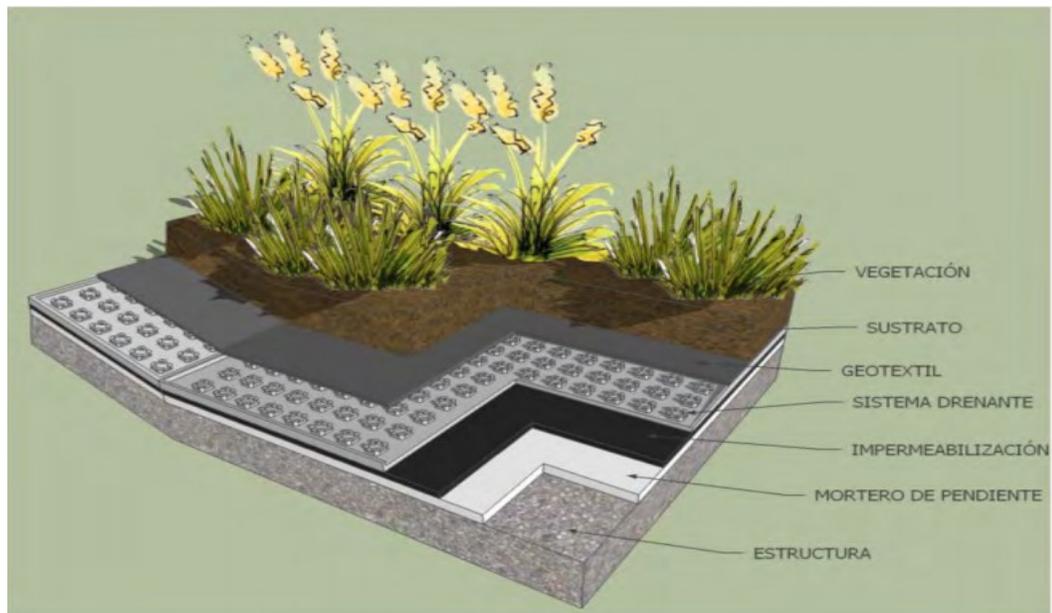
Sistema tipo receptáculo



Fuente: Nieto Escalante (2011).

Figura 5.

Sistema tipo monocapa



Fuente: Nieto Escalante (2011).

5.5 Clasificación de plantas para techos verdes

A partir de la profundidad del sustrato existe una clasificación de las plantas más apropiadas que deben acompañar el techo verde, esta se evidencia en la tabla 5.

Tabla 5.

Identificación de vegetación a partir de sustrato.

Sustrato (cm)	Tipo de vegetación
0 a 5	Sedum, musgos y líquenes
5 a 10	flores silvestres para prados cortos, que crezcan de manera prolongada, nivel alto de tolerancia a la sequía, perennes, pastos pequeños y pequeños bulbos
10 a 20	plantas perennes bajas o medias, flores silvestres, bulbos de espacios secos y subarbustos resistentes

Fuente: *Shafique, Kim, et al. (2018).*

5.6 Beneficios ambientales y para la estructura

Las ventajas que se presentan a partir de la instalación de un techo verde se encuentran tanto al interior como al exterior del edificio, a continuación, se explicarán las más relevantes para el interior del edificio.

Para comenzar está la **reducción del consumo energético**, la cual depende de las características de la estructura y de los componentes del techo verde, ya que gracias a ello se genera un confort en el ambiente del edificio, por ejemplo, la disminución del uso de electrodomésticos de calefacción. En un análisis comparativo de estructuras verdes *versus* techos convencionales se obtuvo que los techos verdes presentan una eficiencia energética considerable, alcanzando un 84% de ahorro energético, en tiempos de enfriamiento para techos verdes intensivos y un 48% en techos verdes extensivos en tiempos donde se necesita calefacción, así mismo en climas tropicales se

evidencio un ahorro energético del 63%, igualmente en el clima desértico tropical los techos verdes extensivos alcanzaron ahorros energéticos de entre un 22 y 25% , también en climas semiáridos los techos verdes semi intensivos presentaron un ahorro de casi un 7,25% y finalmente en los climas fríos se alcanzó para los techos verdes extensivos un ahorro de entre 84 y 100% (Manso, Teotónio, Silva, & Cruz, 2020).

A continuación se encuentra la **mejora de rendimiento fotovoltaico**, la combinación de los techos verdes con energía fotovoltaica genera beneficios como la energía renovable in situ, este es un gran beneficio si la radiación solar es elevada en la zona de estudio, de manera simultánea se ayuda a la disminución de la temperatura, pues toda la energía se vuelve aprovechable, se puede estar generando e 8,3% de la energía que consume el edificio, es importante aclarar que esto es dependiente del tipo de vegetación y las condiciones del clima de la zona de estudio (Shafique, Luo, & Zuo, 2020).

También se encuentra la **reducción de transmisión de sonido**: existen lugares como aeropuertos en Ámsterdam o Frankfurt donde se aplicó el techo verde como solución para mitigar el ruido. La disminución de las ondas sonoras a partir de investigaciones para techos verdes extensivos, varían entre 5 a 20 decibeles, lo cual es dependiente de la frecuencia que se esté generando y la estructura como tal del techo verde (Manso et al., 2020); luego está la **vida de servicio**, la vida útil de un techo verde se encuentra en promedio entre los 45 años, las capas que componen el techo verde actúan de manera conjunta para garantizar la vida útil de la membrana del techo, un techo convencional cuenta con una capa impermeable que dura menos tiempo y no tiene tantas capas de protección (Shafique, Reeho, & Rafiq, 2018).

El **valor de la propiedad** también se ve influenciado, a partir de metodologías variadas, referentes al comportamiento económico adicional que les dan los techos verdes a las propiedades, pues se estima un incremento del 16,2% en alquiler de las estructuras que tienen techos verdes (Manso et al., 2020).

También se tienen las **políticas de incentivos**: los techos verdes pueden llegar a generar beneficios económicos en los lugares donde son aplicados, debido a que se pueden presentar reducciones de impuestos, subsidios, entre otros, adicionalmente a esto se pueden obtener certificaciones, las cuales son importantes porque aseguran el mantenimiento y cuidado del medio ambiente además de promover la generación de prácticas adecuadas en el departamento de la construcción, de las certificaciones la más conocida a nivel mundial es la LEED (Líder En Eficiencia Energética Y Diseño Sostenible) la cuál clasifica al edificio por sustentabilidad y este es un importante reconocimiento (Manso et al., 2020). Para la instalación de los techos verdes en su mayoría de tamaño pequeño, en las ciudades se usa mucho la herramienta de incentivos, en muchos casos estos se enfocan en la parte monetaria con la disminución de tarifas de consumo por ejemplo del agua, no solo se están generando incentivos por su construcción, también se está generando por investigaciones referentes al tema, consultorías, proyectos que eduquen y divulguen la información referente a estas estructuras entre otras (Roggero, 2020). Finalmente se encuentra **la calidad del ambiente interior**, los techos verdes pueden generar que los trabajadores se sientan en un ambiente más sano, lo cual podría ser un factor que aumente su nivel de productividad y por consiguiente se alcanzan estados de comodidad altos (Besir & Cuce, 2018).

5.7 Beneficios Ambientales Urbanos

Como se mencionó en el título 5.6, las ventajas que generan los techos verdes son para el exterior y el interior las estructuras, en el presente apartado se va a hacer referencia a los ítems más relevantes que involucran la parte externa de los edificios.

Para comenzar se tiene **reducción de la temperatura:** la evapotranspiración es una acción fundamental que permite disminuir el efecto de las altas temperaturas ya que a partir de ella se presenta un descenso de la temperatura del aire. Los techos verdes aprovechan la radiación distribuyéndola de manera beneficiosa dentro del sistema ya que llegan a usar casi hasta el 60% de la misma para procesos como la fotosíntesis, en promedio el 13% de la radiación se incorpora al sustrato y de radiación total pueden reflejar el 27% (Sodangi, 2019). La disminución de la temperatura con los techos verdes se encuentra en un rango de 1 a 2,3 °C (Manso et al., 2020).

El **ruido urbano:** El investigador Vijayaraghavan (2016) afirma que para techos verdes extensivos se observaron mejoras de hasta 10 decibeles, mientras que los beneficios acústicos generados por cubiertas verdes intensivas con sustrato mayor a 20 cm no presentaron mayor beneficio a pesar de su estructura.

Luego se encuentra la **administración del agua,** el proceso de filtración dentro de los poros del sustrato o la capa de drenaje genera un efecto retardante en las corrientes de agua pluvial disminuyendo considerablemente su caudal en las tuberías de desagüe. El tiempo estimado del efecto retardante de la escorrentía se encuentra alrededor de los 10 minutos (Sodangi, 2019); la reducción de la escorrentía para techos verdes extensivos tiene un rango de 33 a 81%, mientras que para techos verdes intensivos esta disminución es del 85% (Manso et al., 2020). Así mismo Vijayaraghavan (2016) menciona que en efecto debido a la profundidad del sustrato de los techos

verdes intensivos, estos tienden a alterar la composición del agua llegando al punto de contaminarla, por la filtración que se genera en las capas de la estructura teniendo en cuenta que estas cuentan con mayor grosor; incluso los niveles de evapotranspiración de una cubierta verde intensiva tienden a ser más altos gracias al sustrato y su tipo de vegetación, además se menciona que la radiación es un factor importante que afecta este procedimiento en estas cubiertas (Besir & Cuce, 2018).

Se tiene también la **beneficios referentes a las condiciones en el aire**, es evidente que se necesita trabajo de rigor para los focos emisores de elementos que alteran la composición del aire como lo son: PM10, PM2.5, SO_2 , NO_2 , O_3 y CO, pero, también se pueden generar soluciones innovadoras, como la utilización o aplicación de plantas que usen este tipo de contaminantes para su funcionamiento, es decir, que lo usen dentro de su sistema, por ejemplo las coníferas de hoja perenne, debido a que sus hojas pueden permanecer todo el año (Manso et al., 2020). El material vegetal actúa como un material filtrante que disipa el efecto de los contaminantes del aire ya mencionados, por ejemplo en el caso del SO_2 y NO_2 se evidenció una reducción del 21 y 37% respectivamente cuando esta recién instalada la estructura verde (Sodangi, 2019). Así mismo, aproximadamente 1 m² de techo verde podría mitigar la contaminación por material particulado generado por un auto (Vijayaraghavan, 2016).

Por otra parte, se encuentra la **disminución de la generación de emisiones referentes al carbono**, en las estructuras verdes, el papel que juega la vegetación es muy importante ya que realiza sus procesos fotosintéticos con el carbono presente en la atmósfera, esto influencia en la reducción de huella de carbono. Finalmente se hace referencia a la **salud**, la vegetación de los techos verdes puede ser un factor positivo que beneficie el entorno del ciudadano causando en el

bienestar total, en efecto si se tiene en cuenta todo lo mencionado con anterioridad, esto contribuye de manera directa o indirecta a un buen estado de salud colectivo (Besir & Cuce, 2018).

5.8 Costos

Toda herramienta innovadora que permita mitigar impactos ambientales y de la misma manera genere un bien colectivo, tanto a nivel interno del edificio y como externo en este caso para la ciudad, requiere de unas prestaciones económicas importantes, es por ello por lo que a continuación se va a desglosar lo más relevante en cuanto a costos de techos verdes.

Para comenzar se tiene el **costo de instalación**, este espacio tiene en cuenta todos los precios que rodean la instalación de los techos verdes extensivos, semi intensivos e intensivos. De acuerdo al grupo de investigación de Manso (2020), para cubiertas verdes extensas se tiene un promedio de 434.620 COP/ m², mientras el sistema semi intensivos tiende a ser más costoso que el extensivo debido a su variedad de vegetación, para las cubierta verdes semi intensivas se tienen un promedio de 587.832 COP/m² y finalmente las cubiertas verdes intensivas tienen una tendencia más costosa por su estructura vegetal llegando a alcanzar los 1'589.217 COP/ m² (Manso et al., 2020). Según Limón Bandola (2011), los techos verdes extensivos tienen un costo de instalación promedio de 489.000 COP/m², los techos verdes semi intensivos tienen un promedio de 773.000 COP/m².

Con relación a **operación y mantenimiento**, es necesario identificar cómo se va a hacer el mantenimiento del techo verde, en efecto es importante realizar el contrato completo con los que ofertan el producto, además de los materiales que componen la estructura, se deben tener muy presentes las condiciones ambientales en la que se encuentra la zona donde se planea el proyecto. Los costos de operación y mantenimiento para techos verdes intensivos, semi intensivos y

extensivos, obtenidos a partir de la recopilación de diferentes autores, identifican que un coste promedio de mantenimiento está entre los 19.353 COP/m² (Manso et al., 2020). Según el grupo de investigación de Besir (2018) para techos verdes extensivos los costos asociados son bajos, para techos verdes semi intensivos su mantenimiento debe ser periódico lo cual genera costos promedio, mientras para techos verdes intensivos genera precios altos.

Finalmente se tiene el **costo de disposición**, cuando se desee hacer la disposición total de la estructura verde, con cada uno se generan unos costos específicos, se identifica un valor promedio de 52.681 COP/m² para techos verdes extensivos y de 114.142 COP/m² para techos verdes intensivos (Manso et al., 2020).

6. Estado del arte

En el transcurso de esta sección, se expone el producto obtenido de la revisión bibliográfica realizada sobre tendencias, avances y actualidad en techos verdes, además se realiza una agrupación de la información recolectada.

6.1 Comparación de comportamiento de las edificaciones estructuras con y sin techo verde

El grupo de investigación de Park (2018) realizó un estudio en dos edificaciones (una con techo verde y la otra con techo convencional), ambas sometidas a las mismas condiciones climáticas en una zona densamente poblada. El objeto primordial de este estudio se resume en encontrar la variación de temperatura del aire en los diferentes escenarios propuestos: techos verdes, techos convencionales y la estación meteorológica que se encontraba aledaña a la zona de estudio. En cuanto a la variable de investigación se hace referencia a la temperatura. Los resultados arrojaron que la temperatura en el día para el techo verde fue menor que la que se presentó en el techo convencional y la estación meteorológica, los cambios de temperatura de las dos estructuras analizadas se encontró entre 22,6 y 4,1 °C, además, que las mediciones nocturnas indicaron cambios mínimos en las cubiertas, se encontró que la temperatura para el techo verde fue menor que en la estación meteorológica. (Park, Kim, Dvorak, & Lee, 2018).

En conclusión, se obtuvo una contribución experimental de afirmación a la literatura acerca de que las cubiertas vegetales ayudan a reducir la calidez del ambiente no solo a baja escala sino a gran escala, además de afirmar que los techos convencionales retienen más calor por su estructura (Park et al., 2018)

Los investigadores Hamouz y Muthanna (2019) realizaron una instalación de techo verde y una de techo convencional, con el objetivo de determinar cómo era el comportamiento hidrológico, con ayuda del modelo SWMM (*Storm Water Management Model/ Modelo De Gestión De Aguas Pluviales*) el cual consiste en la modelación del comportamiento de la escorrentía en edificios a partir de la pluviosidad y de determinados intervalos de tiempo, este se utilizó para simular su actividad. Las variables de investigación hacen referencia a la precipitación y la escorrentía.

Los resultados más relevantes arrojaron que después de calibrar el modelo de simulación para la escorrentía, el escenario de techos verdes se encontraba en 0.50 l/s y pasó a 0.96 l/s y en el techo convencional pasó a estar en 0,78 l/s, lo cual es favorable para las estructuras verdes debido a que los resultados están reflejando que con estructuras verdes se puede tener un plus adicional y es el manejo de la escorrentía, situación que no sucede con los techos convencionales , después en el proceso de verificación se indicó un ajuste acertado entre la simulación y los datos reales con un valor de 0.88 l/s para techos verdes y un 0.81 l/s para techos convencionales, según los ajustes por la simulación los techos verdes estarían tratando mayor caudal de escorrentía, finalmente para la modelación de deshielo durante el periodo invernal se obtuvo que la calibración fue de 0,56 l/s para techos verdes y de 0,37 l/s para techos convencionales, a partir de estos datos de calibración se identifica que los techos verdes en temporada de deshielo pueden tratar mayor caudal que los techos convencionales (Hamouz & Muthanna, 2019).

En conclusión, los resultados mencionados sobre escorrentía y deshielo se pueden usar para simular la productividad en varias resoluciones para tejados, también permiten generar datos y direccionar los techos verdes como medidas de manejo para las aguas pluviales (Hamouz & Muthanna, 2019).

Los investigadores Tang y Zheng (2019) realizaron un proyecto cuyo objetivo fue investigar las particularidades de calidez de un techo verde extensivo y uno convencional, en dos estados diferentes, con y sin aire de calefacción a partir de datos experimentales obtenidos en secuencia de días cálidos de verano. De tal manera que las variables de investigación hicieron referencia a radiación solar, flujo de calor y temperatura. En ese sentido los resultados más relevantes de la investigación fueron que la estructura con techo verde alcanzó entre 1.8 y 0.9°C menos de temperatura, tanto en la parte interna como en la parte externa, verificando que la parte de abajo del sustrato actuó como una base de refrigeración, uno de los datos más relevantes del periodo de investigación hace referencia a que la diferencia máxima de temperatura que se alcanzó entre los edificios fue de 5.6°C, además de que se logró identificar que el techo verde genera menor consumo energético por el enfriamiento que genera en el edificio en comparación con un techo convencional (Tang & Zheng, 2019).

En conclusión, la temperatura es un factor determinante para verificar la eficiencia de las cubiertas verdes además para reducir costos energéticos de aplicación de calefacción en los edificios (Tang & Zheng, 2019).

6.2 Nuevas tendencias en los sustratos para los techos verdes

El grupo de investigación de López Uceda (2018) realizó un proyecto cuya finalidad era estimar el grado de contaminación en los lixiviados de los techos verdes, en los cuales el sustrato se mezcló con un agregado que estaba compuesto con material reciclado de construcciones. Las variables de investigación más relevantes fueron las cuatro mezclas de sustrato, una compuesta por el sustrato comercial, otra al 25%, otra al 50% y otra al 75%. Así pues, los resultados arrojaron que, en condiciones de laboratorio y comparados con los límites de directivos de vertimiento, las

muestras no son peligrosas; en efecto, la gran cantidad de sulfato se puede asociar a materiales contenidos dentro del agregado reciclado como por ejemplo el yeso y la cerámica, además materiales dentro del agregado como el ladrillo y tejas, son causantes del cromo en los lixiviados, así mismo en lo referente a los cloruros se determinó que este provenía del sustrato comercial (López Uceda et al., 2018).

En conclusión, a las muestras no se les atribuye peligrosidad para la estructura, por ende, se permite el uso de estos materiales, además de inferir en que las condiciones de laboratorio pudieron interferir en el comportamiento de los resultados sobreestimando el proceder de los materiales del agregado reciclado (López Uceda et al., 2018).

El investigador Nagase (2020) planteó un proyecto cuyo objetivo fue el análisis de la aplicación de materiales reutilizados para la edificación de cubiertas extensivas. Las variables para investigación más relevantes hacen referencia a dos tipos de sustratos: uno de turba de coco y otro compuesto de tapas de polietileno, tallos entre otros, además se tuvo en cuenta la variación de pH, fósforo, amonio, amoniaco entre otros. Los resultados en general arrojaron que la nueva invención de sustrato funcionaba tan bien como un sustrato convencional, pues el sustrato compuesto por materiales reutilizables obtuvo un mayor crecimiento de plantas en comparación con el de turba de coco. En conclusión, se pudo mostrar que la utilización de nuevos sustratos es un tipo de investigación relevante para buscar techos verdes más accesibles y sostenibles (Nagase, 2020).

7. Metodología

A continuación, se da a conocer la metodología con la cual se estructuró este proyecto con el fin de alcanzar los lineamientos planteados en esta investigación, la cual está dividida en fases y determina las actividades y los pasos a seguir por el autor de este documento.

7.1 Fase 1. Recopilación de información para diagnóstico de la zona de estudio

Se determinaron seis ejes temáticos desglosados en etapas para su posterior profundización:

Primera etapa, se revisó el componente geográfico de la zona de estudio, esta información se apoyó en el Plan Ambiental de la Localidad Rafael Uribe Uribe del 2020.

Segunda etapa, se investigó la sección de calidad del aire, se recopilaron datos de los últimos 5 años del informe anual de calidad del aire correspondiente al año 2019, donde se tomó la información de la estación San Cristóbal y Tunal las cuales se encontraron aledañas a la zona de estudio.

En la tercera etapa se indagó sobre mapas que evidenciaron el estado del ruido en la localidad, donde se logró identificar en el mapa de ruido actual generado por la Secretaria Distrital De Medio Ambiente, adicional a esto se encontró información en el Plan Ambiental de la localidad Rafael Uribe Uribe.

Para la cuarta etapa, se consultó el comportamiento de la temperatura por medio de la plataforma Windy, allí se tuvo en cuenta sus respectivos datos en tres horarios diferentes, los cuales fueron evaluados en una semana, esto con el fin de determinar su comportamiento.

Quinta etapa, se estudió el comportamiento promedio de la celeridad de las corrientes en el área del proyecto a partir de la información del Plan Ambiental de la localidad 18 de Bogotá y el Geovisor Ambiental de la Secretaría Distrital De Medio Ambiente. En la etapa final se examinó la humedad relativa de la localidad Rafael Uribe Uribe.

7.2 Fase 2. Evaluación de viabilidad técnica y financiera

A partir de la información que se recolectó en el marco teórico sobre los modelos y tipos de techos verdes se procedió a dividir esta fase en 3 etapas

Primera etapa, se identificó la técnica de construcción más adecuada con ayuda de la selección de criterios los cuales son mencionados en la Tabla 8.

En la segunda etapa, a partir de los componentes de los techos verdes se determinó la cantidad y el tipo de material para exponer dos propuestas, donde se utilizó la ayuda de las empresas A y B (se usan estas siglas para mantener la confidencialidad), compañías especializadas en estas estructuras con el fin de tener las opciones más acertadas.

En la tercera etapa se realizó un análisis costo beneficio a partir de los criterios de selección que se mencionaron con anterioridad y adicionalmente se tuvo en cuenta la información presentada por las compañías consultadas. Además, se realizó un análisis considerando valores subjetivos asociados a los beneficios con el fin de encontrar el punto de equilibrio del proyecto.

7.3 Fase 3. Determinación de la técnica más adecuada para su implementación

Para esta fase se desglosó su procedimiento en dos etapas

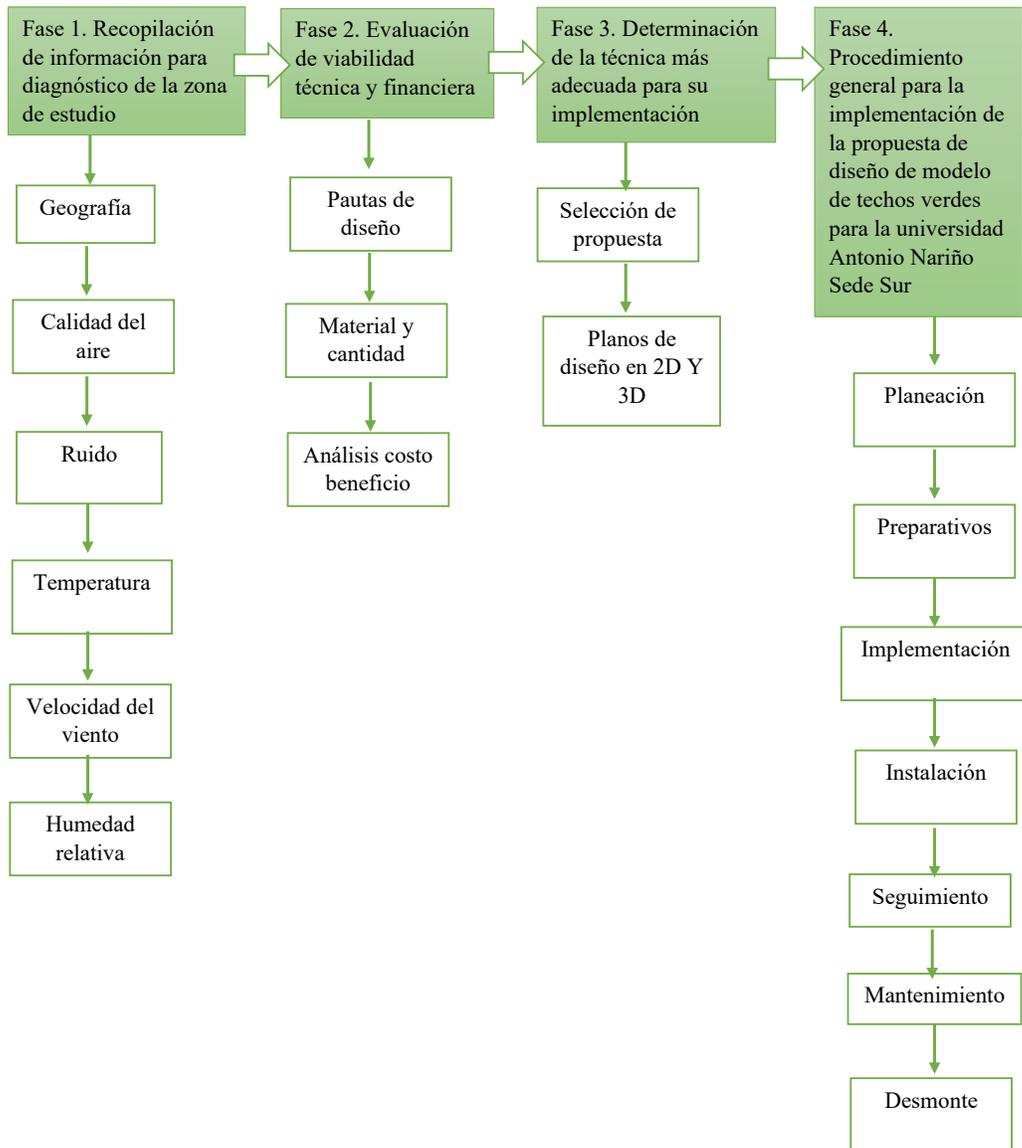
A partir de las dos propuestas de diseño de techos verdes que se mencionaron en la fase anterior se seleccionó la más adecuada ambientalmente hablando, es decir se tuvo en cuenta la capacidad de disminuir tanto a nivel interno como externo el ruido, la capacidad de mitigar el impacto generado por las alteraciones en composición que se encuentran en el aire para el área estudiada, capacidad de reducción de la temperatura , ahorro de energía y manejo del recurso hídrico, también se tuvo en cuenta el factor económico en lo referente a instalación, mantenimiento y desinstalación en ambas propuestas. Para la segunda etapa, se construyó el plano convencional en 2D y 3D de la propuesta de diseño seleccionada a partir de los lineamientos planteados en la fase 2 teniendo en cuenta las etapas 1 y 2.

7.4 Fase 4. Procedimiento general para la implementación de la propuesta de diseño de modelo de techos verdes para la universidad Antonio Nariño Sede Sur

A partir de fuentes nacionales como: (Nieto Escalante, 2011), (García Buitrago, 2014) (UPB Pontificia Universidad Bolivariana, 2015) y además una fuente internacional (Planificaci, 2020), se construyó un procedimiento para la posible implementación de la propuesta de techo verde extensivo seleccionado en la fase 3. Este cuenta con las siguientes secciones: **planeación, preparativos, implementación, instalación, seguimiento, mantenimiento y desmonte.**

En la figura 6 se evidencia el diagrama con la metodología implementada por el autor para la investigación.

Figura 6.
Metodología



Fuente: *Autor.*

8. Resultados Y Discusión

8.1 Fase 1. Recopilación de información para diagnóstico de la zona de estudio

A continuación, se desglosará de manera puntual la información de la zona de estudio en el numeral 8.1.1 Diagnóstico Ambiental.

8.1.1 Diagnóstico Ambiental

Es importante determinar el estado referente a lo ambiental en el que se halla la zona estudiada, por ello es fundamental identificar puntos clave y sus posibles causas, por tal motivo en este apartado se desglosa cada uno en forma de componentes.

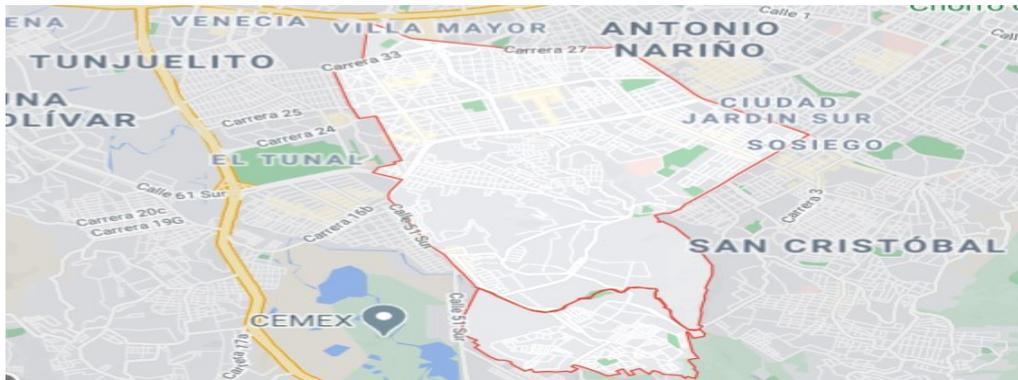
Componente Geografía De La Zona De Estudio

A partir del Plan Ambiental de la localidad Rafael Uribe Uribe se encontró que la localidad está ubicada el parte centro-oriental de la ciudad. Limita con las localidades Antonio Nariño, San Cristóbal y Usme; la geografía de la localidad corresponde a una zona ligeramente ondulada que se ubica en la parte norte y otra inclinada situada al sur; Cuenta con recursos hídricos cómo la quebrada Chiguaza y con el canal Albina el cual entrega sus aguas al Rio Fucha (Ruu,2020).

En la figura 7 se encuentra la ubicación de la localidad Rafael Uribe Uribe, adicional a ello las localidades con las que limita.

Figura 7.

Ubicación localidad Rafael Uribe Uribe



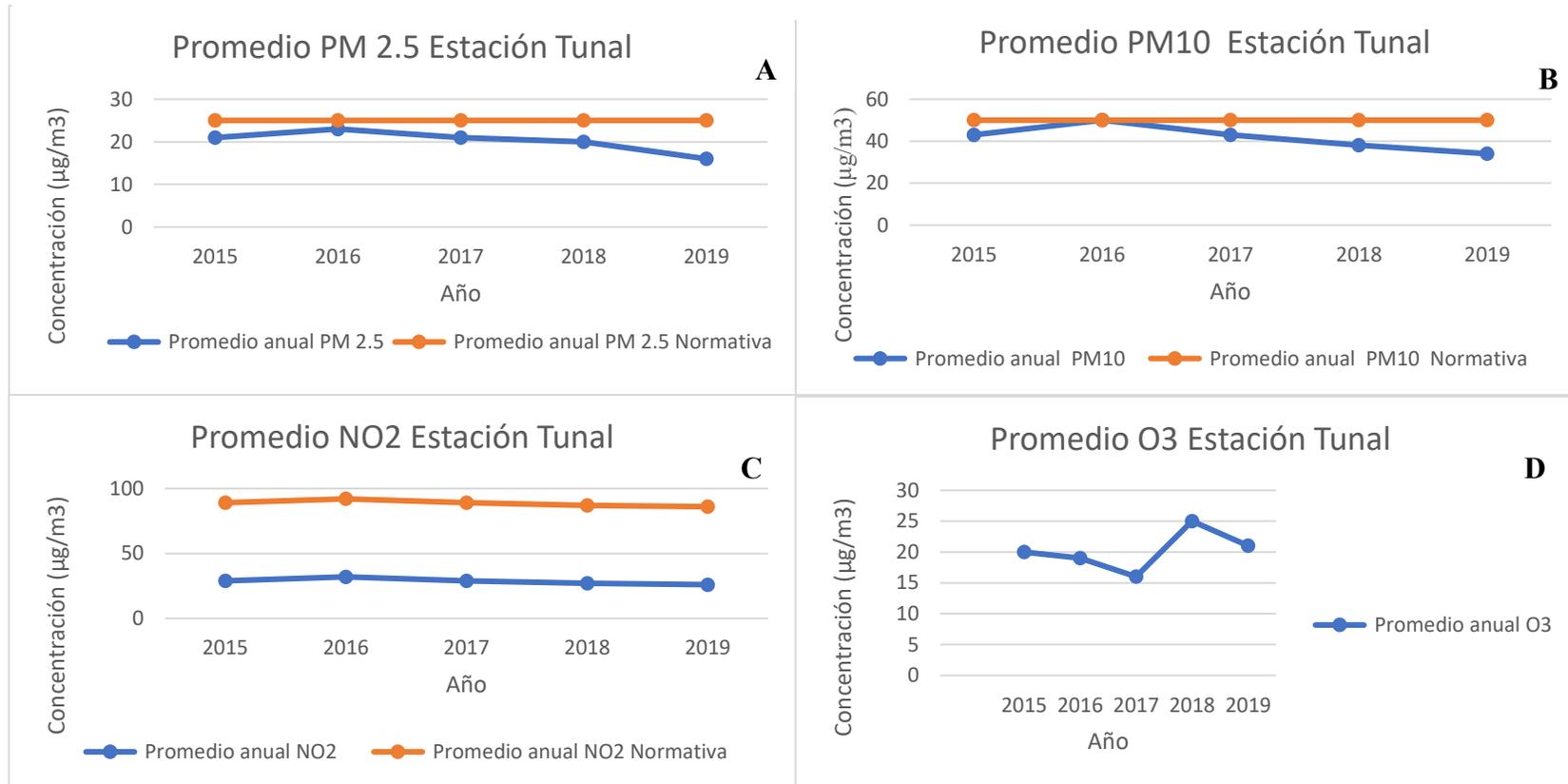
Fuente: *Google Maps (2020).*

Componente Calidad Del Aire

Dentro de este apartado se evidenciarán las condiciones de calidad de aire en el área estudiada. La figura 8, se presenta el comportamiento anual promedio para la estación Tunal durante los últimos 5 años.

Figura 8.

Representación gráfica del comportamiento promedio anual de los contaminantes A) Material particulado de 2.5 micras, B) Material particulado de 10 micras. C) Dióxido de nitrógeno, D) Ozono en la estación Tunal.



Adaptado de Ballesteros, Montealegre, Zambrano, Ortíz, & Arango (2020). Fuente *Autor*.

PM2.5: El numeral A, evidencia que se mantuvo dentro del tope regulado por el lineamiento 2254 de 2017 que son $25(\mu\text{g}/\text{m}^3)$, además la tendencia del contaminante a través del tiempo es descendente y el valor más alto de concentración se presentó en el año 2016 con un valor de $23 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$.

PM10: En el numeral B, el contaminante se ha mantenido dentro de los límites de la normativa, no obstante, en el año 2016 se encontró al límite de la normativa 2254 de 2017 que permite una concentración anual máxima de $50(\mu\text{g}/\text{m}^3)$

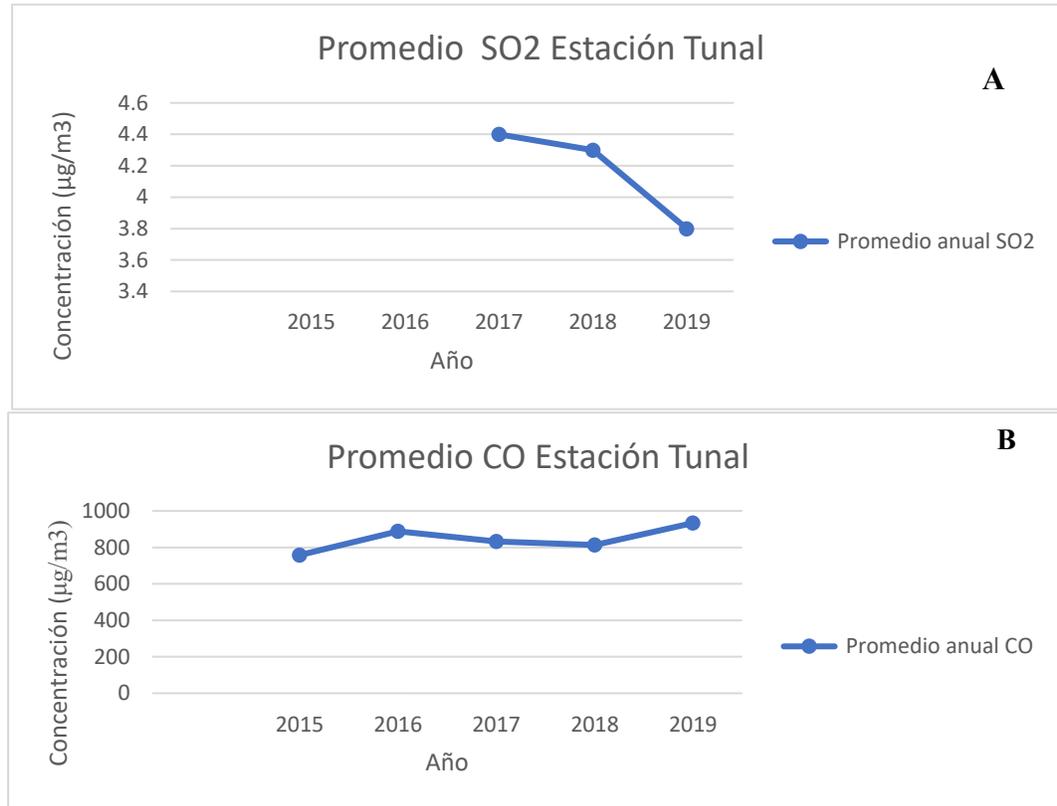
Dióxido de nitrógeno: El numeral C, identifica que el contaminante permanece por debajo de la normatividad establecida resolución 2254 de 2017 en la cual se define un límite anual de $60 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$. Así mismo la concentración anual máxima, se presentó para el año 2016 con un valor de $32 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$, es evidente que su comportamiento es decreciente con el paso de los años.

Ozono: En el numeral D, es importante aclarar que este contaminante no cuenta con un límite normativo, puesto que para concentraciones anuales no existe normatividad, esta solo hace referencia al comportamiento cada 8 horas y este debe tener una concentración límite de $100(\mu\text{g}/\text{m}^3)$, el pico más alto de este contaminante se presentó en el año 2018 con un valor promedio de $25 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$.

La figura 9, evidencia el comportamiento anual promedio para la estación Tunal durante los últimos 5 años.

Figura 9.

Representación gráfica del comportamiento promedio anual de los contaminantes A) Dióxido de azufre, B) Monóxido de carbono en la estación Tunal



Adaptado de Ballesteros et al. (2020). Fuente *Autor*.

Dióxido de azufre: En el numeral A, la estación Tunal en 2015 y 2016 no reportan dato, esto podría deberse a que la estación no tomó los datos completos anuales por ende no se pudo generar el dato correspondiente, no obstante, la normatividad no establece lineamientos anuales, pero sí los establece para 24 horas con un valor de 50 (µg/m³) y para 1 hora con un valor de (µg/m³). Además, el valor máximo que se alcanza es de 4.4 (µg/m³) en el año 2017

Monóxido de carbono: En el numeral B, este contaminante en la resolución 2254 de 2017 no presenta límites anuales de concentración, este presenta lineamientos para 8 horas con un valor

de 5.000 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y para 1 hora con un valor de 35.000 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), además, el valor más alto para el año 2019 con un valor de 934 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

A partir de la Secretaría Distrital de Planeación (2015) se definieron los usos del suelo de la localidad Tunjuelito en la que se encuentra el barrio tunal el cual pertenece a la UPZ 42. En la tabla 6 se evidencia su estructura.

Tabla 6.

Identificación numérica de los usos del suelo

Área de actividad	Zona	Tratamiento	Modalidad
Dotacional	Equipamentos colectivos	Consolidación	Urbanística
Residencial	Neta	Consolidación	Urbanística
Comercio y servicios	Grandes superficies comerciales	Consolidación	Urbanística
Residencial	Con Actividad económica en la vivienda	Consolidación	Urbanística
Suelo protegido	Parque Metropolitano el Tunal	Parques urbanos	Parques a escala metropolitana

Adaptado de Secretaría Distrital De Planeación (2015).

Fuente: *Autor*.

Contrastando la información de los usos del suelo del barrio Tunal con los datos presentados de los contaminantes, se puede concluir que el PM10, PM2.5 y NO2 no han superado los límites normativos establecidos por la norma 2254 de 2017 debido a que su área es más que todo residencial, además cuenta con un área verde importante como el parque Tunal, el cual ayuda

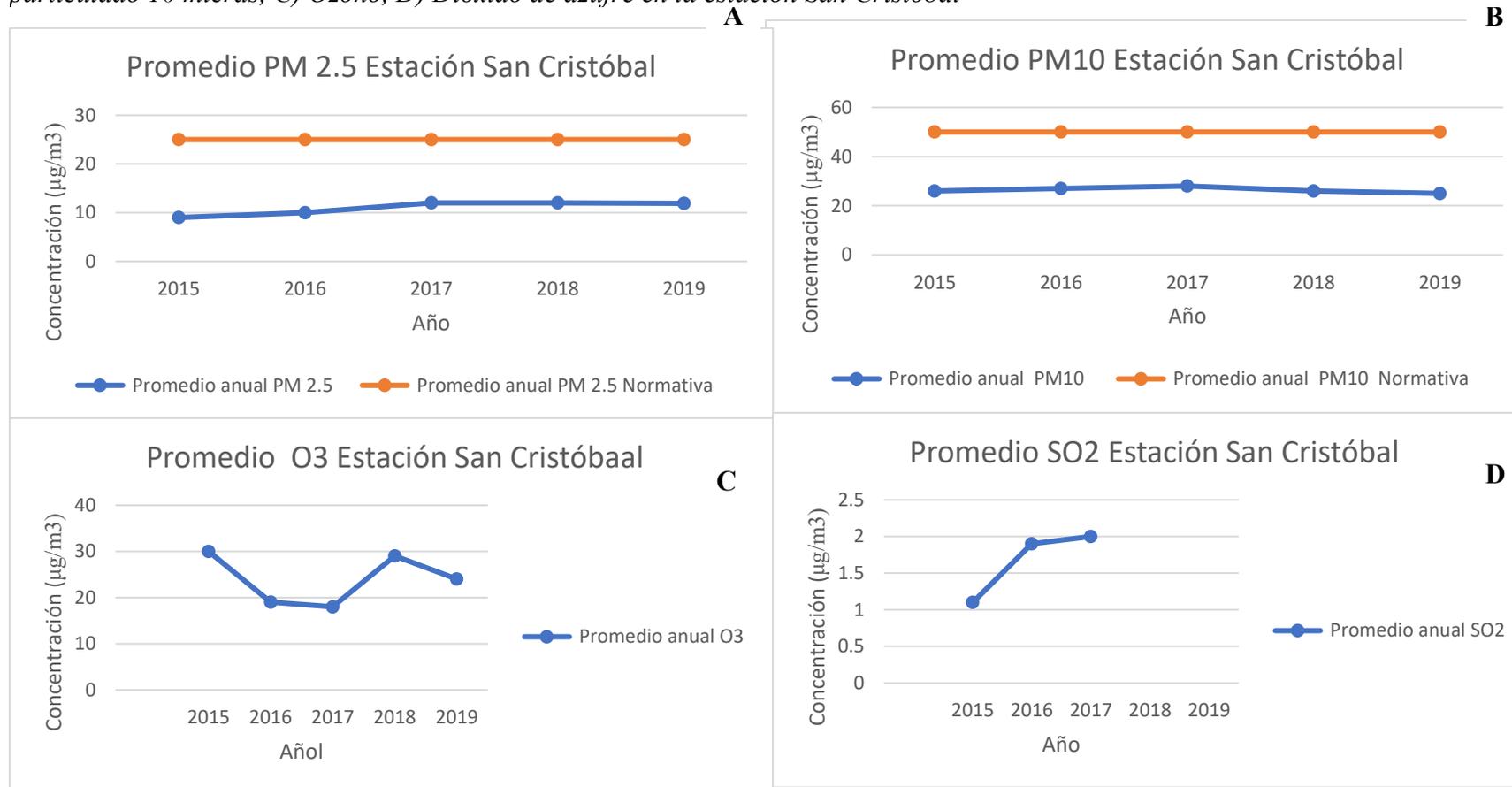
a limpiar el aire de la zona (Cardona Arango & Bermúdez Zapata, 2019) ; finalmente con respecto a los otros contaminantes también se encuentran concentraciones anuales bajas las cuales se podrían asociar a la misma causa.

En la figura 10, se evidencia el comportamiento anual promedio para la estación San Cristóbal durante los últimos 5 años.

San Cristóbal

Figura 10.

Representación gráfica del comportamiento promedio anual de los contaminantes A) Material particulado 2.5 micras, B) Material particulado 10 micras, C) Ozono, D) Dióxido de azufre en la estación San Cristóbal



Adaptado de los datos de Ballesteros et al. (2020). Fuente: *Autor*.

PM 2.5: En el numeral B, el contaminante permanece por debajo de los niveles anuales permitidos por la resolución 2254 de 2017, el cual corresponde a 25($\mu\text{g}/\text{m}^3$), además presenta un comportamiento ascendente con tendencia lineal donde el valor más alto se encuentra en el año 2017, con una concentración de 12 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

PM10: En el numeral A, se evidencia que las concentraciones del contaminante son menores de lo indicado en la resolución 2254 de 2017, en la cual se establece que la concentración anual debe estar por debajo de 50 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), presenta un comportamiento con tendencia lineal, así mismo el dato más alto se presenta en el año 2017 con una concentración de 28 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Ozono: En el numeral C, es importante hacer claridad en que el contaminante no se encuentra lineamiento anual debido a que la resolución 2254 de 2017, no establece un lineamiento para este caso, pero sí establece normatividad para las concentraciones cada 8 horas con un valor de 100 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), en efecto presenta un comportamiento variable y la concentración más alta se encuentra para el año 2015 con un valor de 30 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Dióxido de azufre: En el numeral D, se representan únicamente datos durante 3 años, debido a que del año 2018 -2019 la estación no presenta reporte anual de datos promedio, ahora bien, es importante aclarar que la resolución 2254 de 2017 no establece lineamientos para concentración anual, pero si lo emite para 24 horas con un valor de 50 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y para una hora con un valor de 100 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). El comportamiento a lo largo del tiempo es ascendente y la concentración máxima se encuentra en el año 2017 con un valor de 2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Para concluir esta sección de calidad del aire de la localidad de San Cristóbal, se tiene en cuenta que los usos del suelo en la localidad , según Peñalosa Londoño, Ortiz Gómez, Avendaño Arosemena, & Burbano Guzmán (2017), se encuentran distribuidos en residencial con un 66%,

servicios un 12%, comercio un 12% y dotacional con un 8%, asociando esta información con los datos de los contaminantes se entiende que la localidad de San Cristóbal no es la localidad con mayor índice de contaminación en la ciudad, esto se puede deber a que en su mayoría el uso del suelo es residencial por ello se observa que contaminantes como el PM10 y PM2.5 se encuentran por debajo de lo establecido por la norma 2254 de 2017 y en cuanto a contaminantes como el O3 y SO2 que también presentan concentraciones anuales bajas se asocian a esta misma causa.

Componente Ruido

Uno de los principales emisores de ruido son las vías que se encuentran ubicadas en la localidad, resaltando la Avenida Caracas, la cual en el horario diurno alcanza a llegar hasta los 80 decibeles, además en el horario nocturno, el comportamiento en las principales vías de la localidad disminuye hasta los 10 decibeles, pero es evidente que la generación de ruido nocturno se encuentra en los niveles límite que establece la resolución 0627 de 2006 Expedida Por El Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial (Ruu, 2020).

El comportamiento de los días dominicales genera más ruido en las vías que el resto de los días de la semana, sin embargo, en la noche se puede observar una disminución de hasta 5 decibeles, debido a que el tráfico vehicular se ve considerablemente disminuido. Las operaciones aéreas del aeropuerto El Dorado no representan un factor de ruido en la localidad (Ruu, 2020).

Es importante ubicar la zona de estudio, para ello se encuentra la figura 11 en la cual se identifica la Universidad Antonio Nariño Sede Sur.

Figura 11.

Localización Universidad Antonio Nariño Sede Sur.

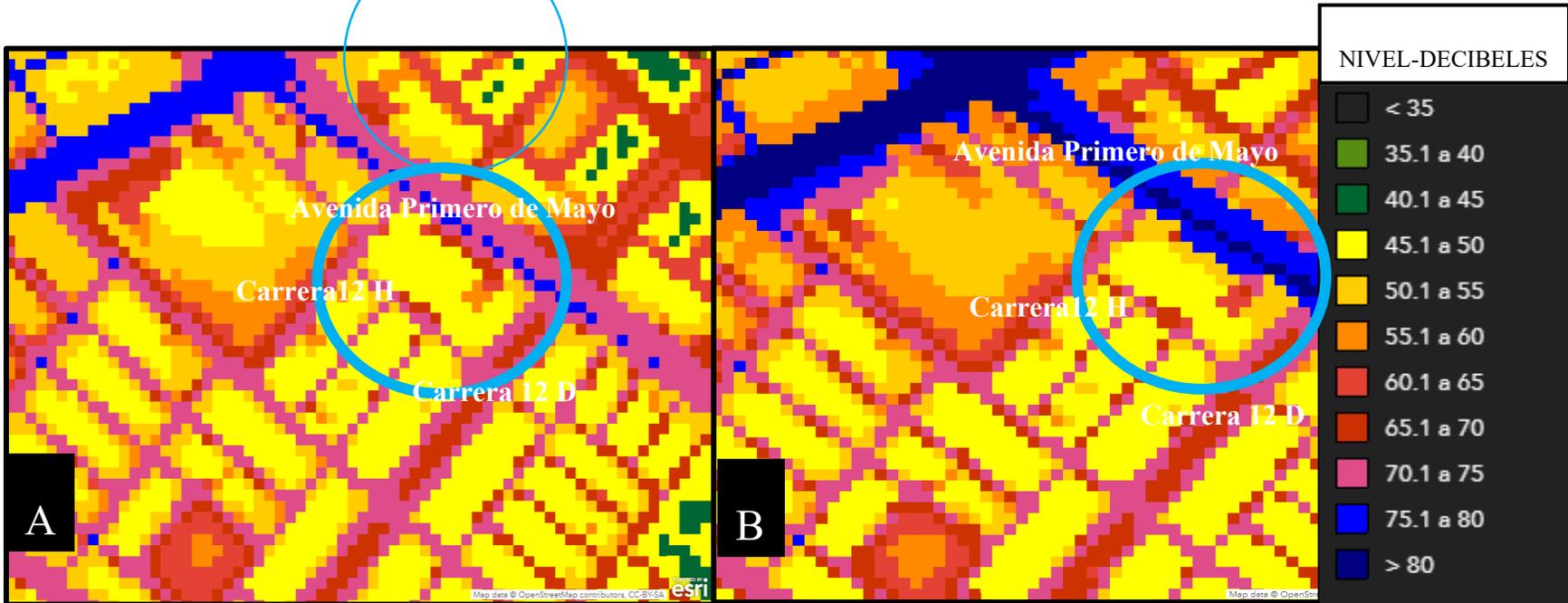


Modificada por el autor. Fuente: *Google Maps (2020)*.

En la figura 12 se puede identificar en detalle el comportamiento de ruido para la Universidad Antonio Nariño Sede Sur, delimitada en círculos azules en cada horario además de sus alrededores; se percibe para el horario nocturno (numeral A), valores máximos de hasta 80 decibeles, así mismo en el horario diurno (numeral B), se evidencian valores máximos entre los 75 y 80 decibeles respectivamente, es importante aclarar que estos datos son actualizados.

Figura 12.

Localización Universidad Antonio Nariño Sede Sur con identificación del comportamiento del ruido A) horario nocturno B) horario diurno.



Modificado por el autor. Fuente: *Secretaría Distrital De Medio Ambiente (2020).*

Para analizar el comportamiento diurno, los resultados muestran que la figura 12 (numeral B) tiende a mostrar que la zona de estudio ha permanecido entre los 60-80 decibeles. En conclusión, es evidente que fuentes móviles como las que comprenden la malla vial de, por ejemplo, la Avenida Caracas o la Avenida Primero de Mayo, han influenciado para que se presente este panorama, además de fuentes fijas como los son establecimientos, incluidos los sitios de esparcimiento y ocio que son aledaños a la zona de estudio. en este orden de ideas, se reafirma la problemática de ruido con la que cuenta la a partir de la normatividad resolución 0627 de 2006 mencionada por Secretaría Distrital de Ambiente (2020), la cual establece que alrededor de zonas institucionales, los niveles límite de ruido son 65 decibeles en el horario diurno.

Componente Temperatura

A continuación, dentro de este apartado se evidenciará el comportamiento de la temperatura evaluado durante una semana en la UAN Sede Sur, la tabla 7 presenta de manera estructurada dicha información.

Tabla 7.

Temperatura en la Universidad Antonio Nariño Sede Sur.

Datos de temperatura en °C para la Universidad Antonio Nariño sede Sur			
Día	6:00 AM	12:00 PM	6:00 PM
20-Nov-20	16	16	11
21-Nov-20	11	17	12
22-Nov-20	11	17	12
23-Nov-20	11	16	12
24-Nov-20	11	17	12

25-Nov-20	12	16	12
26-Nov-20	11	16	12
27-Nov-20	12	15	12

Fuente: *Windy (2020)*.

En conclusión, para el componente temperatura se evidencian variaciones importantes en los tres horarios establecidos de evaluación para una semana, el dato más alto de temperatura hace referencia a 17°C mientras el nivel de temperatura más bajo es de 11°C.

Componente Velocidad Del Viento

Según el Plan Ambiental de la localidad Rafael Uribe Uribe generado por Ruu (2020), los vientos que determinan la terminación de la primera temporada de lluvias en la zona de estudio son los vientos alisios; la celeridad de las corrientes en el área del proyecto es aproximadamente 2m/s (Visor Ambiental, 2020).

Componente Humedad Relativa

A partir del Plan Ambiental de la localidad Rafael Uribe Uribe generado por Ruu (2020), el promedio anual de humedad relativa hace referencia al 82%.

8.2 Fase 2. Evaluación de viabilidad técnica y financiera

8.2.1 Pautas de diseño

Se presentan en la tabla 8 dos propuestas de techos verdes, uno tipo extensivo y otro intensivo; para los criterios de diseño de las propuestas se tuvieron en cuenta los parámetros de: beneficios para cada tipo de techo (franja azul), además de los criterios de diseño de clasificación primaria, secundaria y tipo de tecnología a emplear expuestos por la Secretaria De Medio

Ambiente De Bogotá (franja amarilla). Esta Información fue extraída del marco teórico y de información adicional de la literatura, para lograr hacer más sólidas las propuestas.

Tabla 8.

Criterios de diseño de propuestas de techo verde.

CRITERIOS DE DISEÑO	TIPO DE TECHO VERDE	
	EXTENSIVO	INTENSIVO
Mantenimiento	Bajo: 18.789 COP/m ²	Alto: 24.760 COP/m ²
Instalación	434.620 COP/m ²	1'589.217 COP/m ²
Eliminación de la estructura	52.681 COP/m ²	114.142 COP/m ²
Irrigación	No	Regularmente
Comunidades vegetales	Sedum moranense, Sedum, Sedum Clara de Huevo, menta	Romero, Ajuga, Margarita, manzanilla, Helecho arbóreo
Utilizar	Capa de protección ecológica	Parque como jardín
Ahorro de energía	100%	85%
Trasmisión de sonido	5 db - 20 db	-
Rendimiento fotovoltaico	1,35-2,6%	1,35-2,6%
Vida de servicio	40 años	40 años
Incremento en valor de la propiedad	16,20%	16,20%
Escorrentía de aguas pluviales	33%-81%	85%
Escorrentía pico	49-90%	-
Calidad del aire	Promedio <20% O ₃	Promedio <20% O ₃
	Promedio <29% NO ₂	Promedio <29% NO ₂
	Promedio <79% PM ₁₀	Promedio <79% PM ₁₀
	Promedio > 37% SO ₂	Promedio > 37% SO ₂
Ruido urbano	Aproximadamente 10 db	-
Disminución de la temperatura	0,97°C-2,29°C (promedio 1,34°C)	0,97°C-2,29°C (promedio 1,34°C)
Tipo de clasificación primaria		
Tipo de techo	Techo verde ecológico o autorregulado	Techo verde ajardinado
Profundidad del sustrato	101,6mm	1200mm
Tipo de clasificación secundaria		

Peso en estado saturado	<80 kg/m ²	150-200 kg/m ²
Altura máx. de cobertura vegetal	<20 cm	<200 cm
Tecnología empleada	Multicapa monolítica	Multicapa elevada

Adaptado de (Besir & Cuce, 2018) y (Manso et al., 2020).

Fuente: *Autor*.

8.2.2 Material y cantidad

Gracias a las cotizaciones presentadas por las empresas A y B se logró obtener la información real de los costos de instalación para cubiertas verdes en Bogotá, es importante aclarar que para determinar el área de la zona donde se está proyectando su ubicación, se utilizó la herramienta Google Earth y se determinó que el área de estudio se encuentra aproximadamente en **400 m²**, esta información se hace necesaria para poder estimar las cantidades superficiales necesarias de los componentes de los techos verdes; en la tabla 9 se encuentra la cotización de la empresa A respecto a un techo verde extensivo, es importante aclarar que los el costo de \$260.000 COP/m² incluye todos los componentes de la estructura. En la tabla 10 se evidencia la cotización de la empresa B para un techo verde intensivo, donde se debe hacer la claridad de que el costo \$1'000.000 incluye todas las capas de la estructura.

Tabla 9.

Cantidad y material de construcción para propuesta de techo verde extensivo tipo ecológico autorregulado adaptado de empresa A.

TECHO VERDE EXTENSIVO – TIPO ECOLÓGICO AUTORREGULADO			
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
Vegetación	Sedum Moranense	200	m ²
Vegetación	Sedum Clara de Huevo	200	m ²
Sustrato	Sustrato mineral	400	m ²
Capa de fieltro	Fieltro geotextil Alkor Pluss 81014	400	m ²

Placa de drenaje	Placa drenante y filtrante Alkor Pluss 81015 8mm	400	m2
Capa impermeable	Lámina de policloruro de vinilo flexible (PVC) 2mm	400	m2
Membrana anti-raíz	Manto anti-raíz poliéster 4mm	400	m2
Incluidos todos los ítems anteriores tiene un costo de 260.000 COP/m2			

Fuente: *Autor.*

Tabla 10.

Cantidad y material de construcción para propuesta de techo verde intensivo tipo ajardinado adaptado de empresa B.

TECHO VERDE INTENSIVO– TIPO AJARDINADO			
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
Vegetación	Romero	80	m2
Vegetación	Aguja	80	m2
Vegetación	Manzanilla	80	m2
Vegetación	Margarita	80	m2
Vegetación	Helecho arbóreo	80	m2
Sustrato	Sustrato mineral	400	m2
Capa de fieltro	Geotextil PP1800	400	m2
Placa de drenaje	Lámina Drenaje 32T	400	m2
Capa impermeable	Geotextil PP2500	400	m2
Membrana anti-raíz	Polietileno de alta densidad y bentonita	400	m2
Incluidos todos los ítems anteriores tiene un costo de 1'000.000 COP/m2			

Fuente: *Autor.*

8.2.3 Análisis costo beneficio

A partir de los costos recopilados en la literatura y los expresados por las empresas A y B se establecieron las tablas 11 (techos extensivos) y 13 (techos intensivos), en las cuales se presentan los beneficios asociados a partir de los costos de mantenimiento e instalación. Estos beneficios son tomados a partir de la Tabla 8, en la que se indican los criterios de diseño y en

donde se hace una clasificación para cada tipo de techo verde. En esta sección también se tuvo en cuenta el punto de equilibrio para ambas propuestas planteadas, esta información es generada a partir de las tablas 12 (para techos verdes extensivos) y 14 (para techos verdes intensivos), se parte de la premisa generada por Baca Currea (2005), la cual hace referencia a que en este proyecto se puede aplicar la asignación de valores para evaluación bajo condiciones de incertidumbre es decir de forma subjetiva.

Tabla 11.

Análisis costo beneficio para Techos verdes extensivos.

Costo	Beneficio
Instalación: 260.000 COP/m2	Ahorro de energía por calefacción
	Trasmisión de sonido
	Ruido urbano
	Incremento del valor de la propiedad
Mantenimiento: 18.789 COP/m2	Mejora en la calidad del aire
	Escorrentía de aguas pluviales
	Escorrentía pico
	Disminución de la temperatura

Fuente: *Autor.*

En la tabla 11 se está expresando el costo por metro cuadrado, se estima que el área de construcción es de 400 m2 es decir que el costo total aproximado de instalación es de 104.000.000 COP y en cuanto a su mantenimiento oscilaría en 7.515.600 COP.

Tabla 12.

Asignación de valores a costos y beneficios para Techos verdes extensivos

Ítem	Costo	Beneficio	B/C	Aceptación	
				Si	No
Ahorro energético por calefacción	104.000.000	1.500.000	0.014		x

Trasmisión de sonido	104.000.000	900.000	0.009	x
Ruido Urbano	104.000.000	900.000	0.009	x
Incremento en el valor de la propiedad	104.000.000	1.600.000	0.015	x
Mejora en la calidad del aire	7516600	1.400.000	0.186	x
Escorrentía Aguas pluviales	7516600	1.500.000	0.200	x
Escorrentía Pico	7516600	1.500.000	0.200	x
Disminución de la temperatura	7516600	1.000.000	0.133	x

Fuente: *Autor.*

En la tabla 12 para la propuesta de techos verdes extensivos se tuvo en cuenta los costos totales de instalación y mantenimiento además del valor asignado como beneficio anual. A partir de estos datos y usando la relación costo/ beneficio, se encontró que aproximadamente en 10 años y 8 meses se llega al punto de equilibrio.

Tabla 13.

Análisis costo beneficio para Techos verdes intensivos.

Costo	Beneficio
Instalación: 1'000.000 COP/m2	Ahorro de energía
	Incremento del valor de la propiedad
	Beneficios en la salud
Mantenimiento: 24.760 COP/m2	Mejora en la calidad del aire
	Escorrentía de aguas pluviales
	Disminución de la temperatura

Fuente: *Autor.*

En la tabla 13 se está expresando el costo por m2, como se mencionó anteriormente se estima que el área de construcción es de 400 m2 es decir que el costo total aproximado de

instalación es de 400.000.000 COP y en cuanto a su mantenimiento oscilaría en 9.904.000. COP. Estos costos son mayores debido a que el sistema maneja una vegetación más grande y requiere mayor mantenimiento.

Tabla 14.

Asignación de valores a costos y beneficios para Techos verdes intensivos

Ítem	Costo	Beneficio	B/C	Aceptación	
				Si	No
Ahorro Energético por calefacción	400000000	2.300.000	0.00575		x
Incremento en el valor de la propiedad	400000000	3.000.000	0.008		x
Mejora en la calidad del aire	9904000	2.500.000	0.252		x
Escorrentía de aguas pluviales	9904000	3.500.000	0.353		x
Disminución de la temperatura	9904000	3.000.000	0.303		x

Fuente: *Autor.*

En la tabla 14 para la propuesta de techos verdes intensivos se tuvo en cuenta los costos totales de instalación y mantenimiento. A partir de estos datos y usando la relación costo/beneficio, se encontró que aproximadamente en 28 años y 6 meses se llega al punto de equilibrio

8.3 Fase 3. Determinación de la técnica más adecuada para su implementación

8.3.1 Selección de la propuesta de techo verde ambiental y económicamente hablando

Para seleccionar la propuesta, primero se tienen en cuenta los resultados obtenidos del diagnóstico y en base a ello, se genera una elección, además de considerar algunos criterios de

diseño que se destacan por su factor ambiental; para finalizar, se abarcará la temática de costos la cual ratifica la elección de la propuesta y beneficios a la comunidad.

- En primer lugar, el diagnóstico presentado en la sección 8.1 evidenció que una de las problemáticas que más afectan la zona de estudio es el ruido, el cual alcanza a llegar hasta los 80 db (Secretaría Distrital De Medio Ambiente, 2020). Gracias a la recopilación de información bibliográfica, se identificó que los **techos verdes extensivos** llegan a reducir la propagación de ruido del edificio aproximadamente 5 a 20 db (Manso et al., 2020) y que el ruido perceptible en el edificio llega a tener una reducción de entre 10 db (Vijayaraghavan, 2016); mientras la información de mitigación de ruido por parte de los techos **verdes intensivos** no presenta mayor beneficio (Vijayaraghavan, 2016).

En lo referente a la calidad del aire, en los dos puntos cercanos a la zona de estudio, en la estación San Cristóbal y Tunal durante los últimos 5 años se ha evidenciado un comportamiento estable en los datos a nivel de promedio anual, debido a que los contaminantes que están regulados bajo la norma 2254 de 2017 presentan concentraciones que se encuentran por debajo de la misma: este es el caso del contaminante PM10, PM2.5 Y NO2 (Ballesteros et al., 2020). Dentro de los beneficios que ofrecen tanto los techos verdes **intensivos** como **extensivos** se encuentra, por ejemplo, que un metro cuadrado tiene la capacidad de mitigar la contaminación por material particulado que genera un auto (Vijayaraghavan, 2016); este dato es importante si se tiene en cuenta que el área proyectada son 400 m2 aproximadamente, es decir que estaría mitigando la contaminación generada aproximadamente por 400 vehículos (las cantidades de contaminantes aproximadas se encuentran en mayor detalle en la tabla 6 donde se describen los criterios de diseño); también se debe tener en cuenta las emisiones de carbono, ya que como menciona Besir & Cuce (2018) el material vegetal que compone los techos verdes realiza sus procesos

fotosintéticos con el CO₂ atmosférico , lo cual representa una disminución en estas emisiones, se presentaría una disminución considerable si se tiene en cuenta el área estimada del proyecto.

En lo referente a temperatura en el diagnostico se evidenció que la información anual promedio de las dos estaciones cercanas a la zona de estudio durante los últimos 5 años osciló entre los 13,6°C y los 14,4°C (Ballesteros et al., 2020); la información de la literatura afirma que los techos verdes tanto **intensivos** como **extensivos** tienen la capacidad de reducir la temperatura entre 1 a 2.3°C (Manso et al., 2020), es decir que ambas propuestas se encuentran a la par en este apartado. Sodangi 2020 menciona el gran aprovechamiento que hacen los techos verdes de la radiación dentro del sistema, ya que esta es utilizada para procesos fotosintéticos y para el sustrato, tan solo un pequeño porcentaje es reflejado. Aquí es importante tener en cuenta estos aprovechamientos solares, ya que la temperatura a nivel mundial está presentando variaciones importantes y cada vez más drásticas como lo menciona Zhai, Zhou, & Chen (2018).

- En segundo lugar, se hace referencia a los criterios de diseño que se destacan por su factor ambiental, entre ellos se destacan el ahorro de energía. Existen algunas salas del bloque 5 que tienden a ser muy calurosas, por lo que con la ayuda de los techos verdes se podría disminuir esa situación, además de ello, se evitaría que se requirieran equipos eléctricos para controlar el aumento de la temperatura por el calentamiento global, lo cual conllevaría a que existiera un ahorro energético del 100% en el caso de implementar techos verdes **extensivos**, o del 85% para los techos verdes **intensivos** como lo menciona los grupos de investigación de Besir (2018) y Manso (2020); esto porque el techo verde favorecería un menor consumo de los equipos puesto que los techos pueden regular temperatura.

También se hace referencia al manejo del agua, en lo referente a la escorrentía según el grupo de investigación de Manso 2020 se menciona que los **techos verdes intensivos** tienen un manejo de 85%, mientras **los techos verdes extensivos** tienen la capacidad de manejar de un 33 a 81% de la escorrentía y un beneficio adicional, pues también manejan la escorrentía pico entre un 49 a 90%, lo cual los hace más eficientes. Además, se debe tener en cuenta que Vijayaraghavan (2016) mencionan que la calidad del agua que recorre el sistema de los **techos verdes intensivos** puede verse contaminada debido al grosor del sustrato y las capas que componen el sistema; es importante mencionar que los techos verdes en general juegan un papel muy importante en cuanto a retención de aguas lluvias, ya que tienen la capacidad de almacenarla en su estructura aproximadamente 10 minutos (Sodangi, 2019) lo cual es una ventaja inminente si se proyecta el uso de estas aguas como recurso dentro del mismo edificio para suplir necesidades hídricas, por ejemplo de los sanitarios o para hacer aseo entre otras.

A partir del punto de vista ambiental y basados en los datos encontrados de la revisión bibliográfica los **techos verdes extensivos** presentan mayor ventaja con respecto a los techos verdes intensivos por un punto clave: si se tiene en cuenta que la principal problemática de la zona de estudio es el ruido, los **techos verdes extensivos** están generando una manera efectiva para mitigar el impacto.

- En tercer lugar, en cuanto a costos se encontró una ligera variación de los precios que presenta la literatura con los que se encuentran en la actualidad para Bogotá. Por ejemplo, para la instalación de un **techo verde extensivo** según Manso et al., (2020) es de 434,620 COP/m², mientras que a gracias a los datos obtenidos por la compañía A se fijó un precio de 260.000 COP/m²; en cuanto al mantenimiento, Manso et al., (2020) establece un valor de 18.789 COP/m², además de establecer que para la eliminación de la estructura se tiene

un costo de 52.681 COP/m². Para los **techos verdes intensivos** según Manso et al., (2020), establece por literatura un costo de instalación de 1'589.217 COP/m², mientras que la empresa B establece un costo real de 1,000.000 COP/m². El grupo de investigación de Manso (2020), establece un valor de mantenimiento de 24.760 COP/m², y de desinstalación de 114.142 COP/m².

Si se tiene en cuenta el factor de costos, la mejor opción o propuesta es la de un **techo verde extensivos**, ya que genera más beneficios con menor inversión por metro cuadrado; también se debe tener en cuenta que su mantenimiento o desinstalación tienen menor costo.

- En último lugar, además de los beneficios ambientales y económicos se podrían generar otros beneficios tanto la UAN Sede Sur y población aledaña; ya que según los investigadores Besir y Cuce (2018), la vegetación de los techos verdes favorece el entorno ciudadano, lo cual contribuye a un estado colectivo de bienestar. Los investigadores también afirman que se puede generar calidad en el ambiente interior del edificio, además, si se tiene en cuenta que es un ambiente estudiantil, se puede obtener mejor rendimiento por parte de los estudiantes, ya que se aumenta la productividad y altos estados de comodidad.

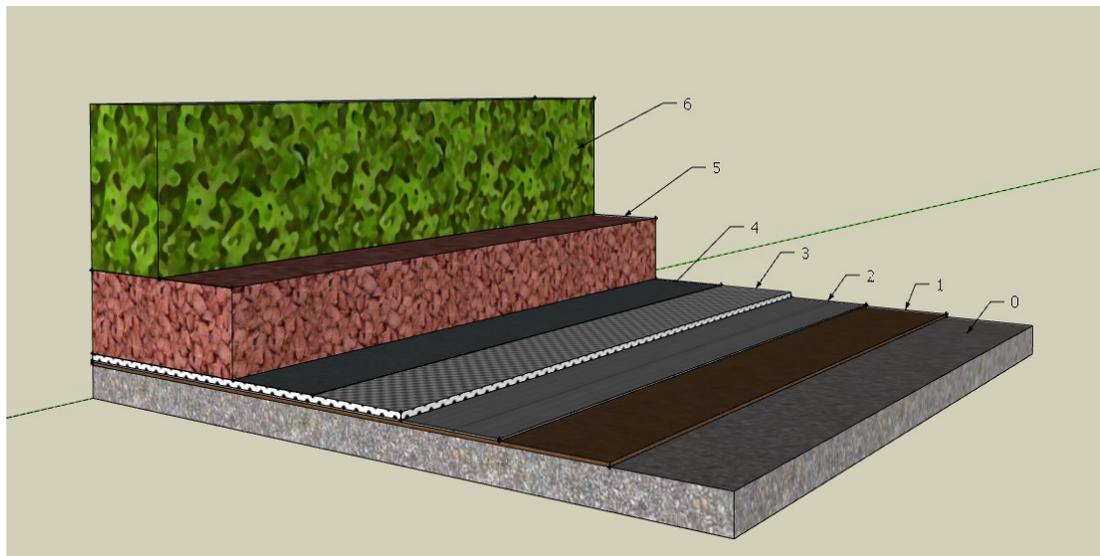
Si se decide implementar la propuesta de techo verde en la universidad se pueden lograr grandes reconocimientos por ejemplo, la política de incentivo LEED (Líder En Eficiencia Energética Y Diseño Sostenible) (Manso et al., 2020) puede ofrecer reconocimiento a nivel internacional por la implementación de soluciones sostenibles. Esto podría dar a conocer más la universidad, con lo cual se alcanzarían nuevos accesos o ingresos a la misma.

8.3.2 Plano de la propuesta de diseño

En la figura 13 se evidencia la estructura de la propuesta en 3D donde a partir de la numeración se identifica cada componente del sistema 0) cubierta, 1) membrana anti-raíz, 2) capa impermeable, 3) placa de drenaje, 4) capa fieltro, 5) sustrato y 6) vegetación.

Figura 13.

Plano de techo verde extensivo en 3D

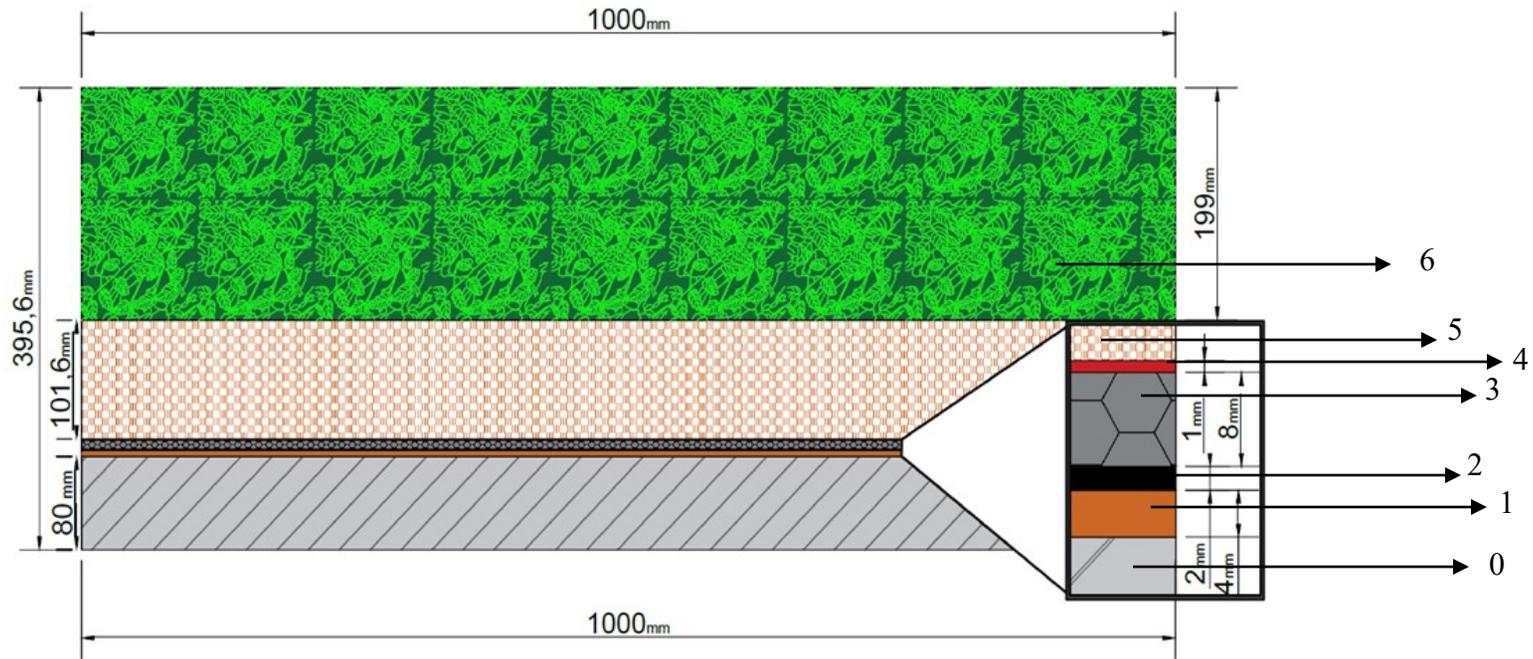


Fuente: *Autor.*

En la figura 14 se encuentra el plano en 2D de la propuesta de diseño, los componentes del sistema se encuentran en el siguiente orden 0) cubierta, 1) membrana anti-raíz, 2) capa impermeable, 3) placa de drenaje, 4) capa fieltro, 5) sustrato y 6) vegetación, es importante aclarar que este ya se encuentra acotado con sus respectivas medidas.

Figura 14.

Plano de techo verde extensivo 2D.



Fuente: *Autor.*

8.4 Fase 4. Procedimiento general para llevar a cabo la propuesta de diseño de modelo de techos verdes para la universidad Antonio Nariño Sede Sur

A continuación, se recopiló información de diferentes fuentes nacionales como: (García Buitrago, 2014), (Nieto Escalante, 2011), (UPB Pontificia Universidad Bolivariana, 2015) y además de ello se consultó una fuente internacional (Planificaci, 2020). Todo esto con el fin de generalizar los pasos a seguir si se desea construir la propuesta mencionada de techos verdes para la universidad Antonio Nariño Sede Sur.

8.4.1 Planeación

Es recomendado que el área de la estructura sea mayor a 100m², en esta etapa se debe hacer toda la recopilación de información necesaria para el proyecto, se debe tener en cuenta diseño arquitectónico, estructural e hidrosanitario; debe haber dos responsables de la obra, una parte técnica de la estructura y otro encargado del techo verde; la información requerida para el proyecto debe incluir : información general del edificio, la identificación del propósito del edificio y el estado del ambiente y el entorno que se desea intervenir.

8.4.2 Preparativos

En la figura 15 se puede ejemplificar el procedimiento de preparativos para el techo verde, pero es importante que para el comité previo a la construcción se deba tener en cuenta:

1. La presentación del equipo de trabajo que debe estar al menos compuesto por un arquitecto o ingeniero y un horticultor.

2. Revisión técnica de los planos y generación de soluciones a posibles problemáticas que se presenten.
3. Generar la metodología de trabajo: cronogramas, metas entre otros.
4. Garantizar que el espacio es seguro para trabajar.
5. Asegurar el buen estado de los materiales, como por ejemplo de la cubierta o la membrana de impermeabilización, durante todo el proceso de desarrollo de la obra.

Figura 15.

Preparativos para un techo verde.



Fuente: *Noticias de Taiwan (2014).*

En la tabla 15 se encuentra la información para que el proveedor entregue el proyecto, esta se debe tener en cuenta como ficha técnica.

Tabla 15.

Ficha técnica del proveedor del proyecto de techo verde.

Ficha Técnica			
Proveedor del sistema		Contacto	
Diseñador		Contacto	
Contratista instalador		Contacto	
Dueño u operador responsable del inmueble			
Localización			
Nombre del Inmueble		Uso	
Tipo de techo verde			
Indicar si es transitable o no			
Elementos principales de la estructura ecológica principal más cercanos		Localización con respecto al techo verde	
Fecha de prueba de estanquidad u otro método válido para la detención de filtración o fugas de la membrana de impermeabilización			
Grado de mantenimiento requerido			
Fecha prevista de consolidación			
Responsable de mantenimiento			
Cuadro de especies vegetales			
Cumplimiento con las disposiciones presentes en la guía			

Adaptado de (Nieto Escalante, 2011). Fuente: *Autor*.

8.4.3 Implementación

Se debe tener en cuenta el apartado 5.4 para clasificar la tecnología del techo verde y se deben tener en cuenta los siguientes prerrequisitos:

- **Seguridad:** dónde se debe asegurar a todos los trabajadores dotándolos de los implementos necesarios, se pueden instalar dentro de la cubierta dispositivos adicionales como el que se muestra en la figura 16, la cual hace referencia a un anclaje que tiene la capacidad de permitir al trabajador un mayor movimiento en la zona y de forma segura para facilitar el mantenimiento e inspección de la estructura.
- **Instalación:** se debe tener en cuenta los acabados de placa o superficie de instalación, la pendiente y la red de evacuación de aguas lluvias, para aquellas superficies que cuentan con pendiente los requerimientos de implementación son diferentes a aquellas que no cuentan con estas características, las disposiciones requeridas de prioridad son: asegurar que el sustrato sea estable , que se genere una protección contra el desgaste y que se tenga la capacidad de contención de agua, además se debe tener en cuenta que el tipo de vegetación se ajuste a la estructura, en estos escenarios son muy importantes las capas de impermeabilización anti raíces y una capa de protección que retenga altas cantidades de agua, en este tipo de cubiertas es fundamental planificar el mantenimiento y cuidado desde el inicio.

Figura 16.

Anclaje que da libertad de movimiento.



Fuente: *Planificaci (2020).*

8.4.4 Instalación

En la figura 17 se puede evidenciar como debería ser la estructura del techo verde teniendo en cuenta que para la instalación se debe tener presente el siguiente orden:

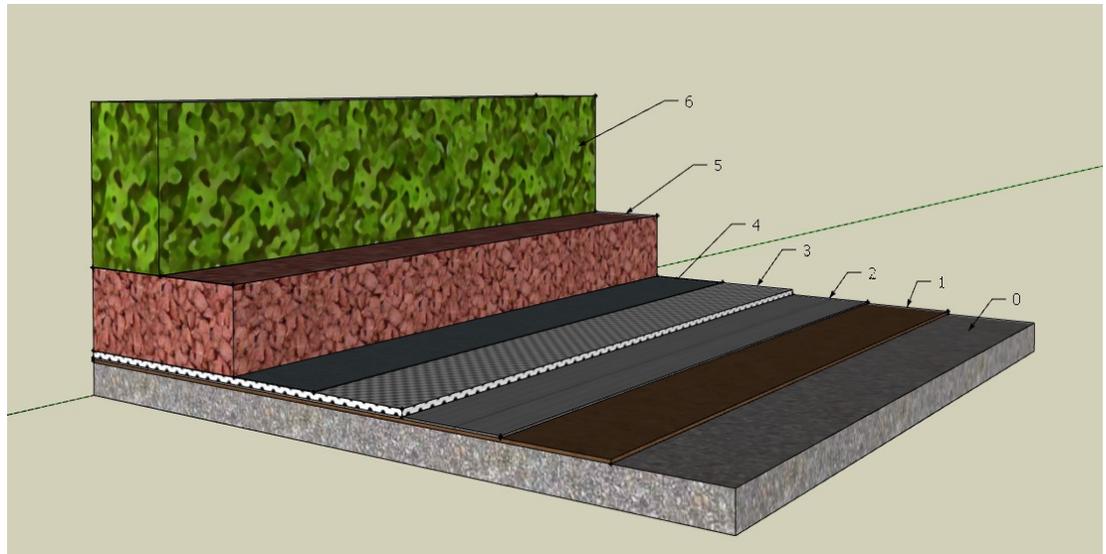
0. Cubierta: Esta se debe encontrar en óptimas condiciones para colocar sobre ella la estructura del techo verde.
1. Impermeabilización y barrera anti-raíz: es necesario hacer una revisión de la superficie de soporte, debe hacerse el montaje de manera uniforme, se recomienda que el material sea sintético, para evitar que se genere crecimiento de las raíces. Es importante hacer una prueba de estanqueidad para verificar su correcto funcionamiento en toda el área de instalación. Esta prueba dura aproximadamente 48 horas, es preciso llevar un registro diario de toda la prueba, identificando siempre los encargados de esta actividad.
2. Elementos de protección y desagües: estos deben ser resistentes a las condiciones exteriores y es necesario asegurar que en ellos no se generen filtraciones.
3. Medios de drenaje: hay que garantizar que no se presenten taponamientos por el agua lluvia, es preciso hacer seguimiento para que no se afecte la instalación de las capas de la parte de arriba.
4. Barreras filtrantes: este geotextil debe desplegarse por toda el área de tal manera que se ajuste con todos los componentes del sistema. Se propone usar materiales como arena para evitar aspiración por parte del viento.
5. Medios de crecimiento: es esencial que este cumpla con las condiciones adecuadas de la cobertura vegetal, debe tener una distribución adecuada en el área del sistema. Por cada 5m³ de sustrato se recolecten dos muestras de 3kg, las cuáles deben estar plenamente identificadas, a una de esas muestras se le practica una prueba de laboratorio en la cual se

verifica que cumpla con las condiciones necesarias para la capa vegetal, la segunda muestra debe permanecer por si se desean hacer análisis después o en dado caso que se genere perdida de datos de la primera muestra.

6. Cobertura vegetal: se puede realizar de tres maneras diferentes: 1) plantar por esqueje: se usa los tallos y se colocan entre la primera y segunda capa del medio de crecimiento. 2) sembrar las plantas: se hace posterior a la colocación del sustrato, el terreno debe estar húmedo. 3) con tapetes pre-cultivados: hace referencia a una estructura con una cobertura vegetal la cual no posee gran altitud y se debe encontrar al 75% de crecimiento.

Figura 17.

Orden de las capas del sistema techo verde.



Fuente: *Autor.*

8.4.5 Seguimiento

En esta etapa se debe hacer un seguimiento al techo verde para determinar si está funcionando de manera correcta y si su desarrollo es el adecuado de acuerdo con la vegetación de la estructura. En la figura 18, se puede evidenciar un ejemplo de seguimiento a una estructura verde.

Figura 18.

Etapa de seguimiento.



Fuente: *Sechague Otálora (2016).*

8.4.6 Mantenimiento

Este proceso se debe realizar posterior a la fase anterior, el que suministró la estructura debe hacer entrega de un manual a su cliente donde le indique cómo se debe realizar el proceso, donde se menciona como mínimo cuál es el proceso de tránsito dentro de la estructura, cuanto tiempo tiene de garantía, cuál va a ser la metodología de mantenimiento y cada cuanto se realizará el proceso entre otros. Para que se realice un adecuado mantenimiento se deben buscar

herramientas que permitan a los trabajadores desarrollar de la manera más adecuada y pertinente su labor como por ejemplo la herramienta mencionada en la implementación, en la figura 19, se puede observar un ejemplo de mantenimiento a una estructura verde.

Figura 19.

Mantenimiento de un techo verde.



Fuente: *Vida Sustentable XXI (2017)*.

8.4.7 Desmonte

Es indispensable realizarlo bajo los más estrictos parámetros de seguridad, se debe hacer componente por componente, lo ideal sería separar los componentes que se pueden reutilizar, mientras, los que no se incluyan dentro de este proceso deben cumplir con una correcta disposición final, es importante tener un manejo adecuado de los RCD (residuos de demolición y construcción) se aconseja seguir los lineamientos estipulados por el decreto 586 de 2015 emitido por (Secretaría Distrital de Ambiente, 2015) para gestionar estos materiales de manera sostenible y eficiente. En la figura 20 se puede ejemplificar un procedimiento de desmonte de una cubierta vegetal.

Figura 20.

Desmonte de un techo verde.



Fuente: *Ecotelhado (2020).*

9. Conclusiones

A partir de la aplicación de los métodos aplicados en este trabajo de grado y siguiendo los lineamientos utilizados en la literatura como guías de techos verdes y artículos, se logró considerar una propuesta de techo verde extensivo para la Universidad Antonio Nariño Sede Sur.

De acuerdo con el diagnóstico realizado se lograron determinar las condiciones ambientales de la Universidad Antonio Nariño Sede Sur, de las cuales **la problemática de ruido** es la más importante con respecto a las otras analizadas, esto se debe a que se sobrepasan los niveles establecidos por la resolución 0627 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Con base a las condiciones ambientales descritas y los beneficios que aporta, se seleccionó la técnica de diseño de techo verde extensivo para el bloque 5, teniendo en cuenta que disminuye el nivel de ruido a nivel interno y externo, contribuye a mejorar la calidad del aire, mejora las condiciones de temperatura, genera bienestar colectivo entre otros.

Con el trabajo realizado y la propuesta presentada generalizada de techo verde, se logró identificar que los techos verdes de tipo extensivos generan más beneficios con menor inversión que los techos verdes intensivos, esto se determinó a partir del análisis costo beneficio el cual involucro la agrupación de los beneficios para cada propuesta de techo verde, esto se complementó con los precios que ofrecieron tanto la literatura como las empresas A y B que fueron consultadas para el estudio.

10. Recomendaciones

- ✓ Si se desea continuar con el proyecto, se recomienda que se trabaje con los planos del edificio, con el fin de identificar los puntos exactos de las canaletas de la estructura, para construir un modelo de tubería adicional con el cual se pueda proyectar un uso eficiente del agua recopilada por el techo verde, esto podría generar un ahorro de agua para la universidad Antonio Nariño Sede Sur.
- ✓ Si desea continuar con esta línea, un gran aporte podría ser la investigación en el uso de sustratos a partir de materiales reciclados o residuos, para esta propuesta de techo verde.
- ✓ En dado caso de que se genere una posible implementación del techo verde extensivo, una herramienta que puede utilizar como guía la Universidad Antonio Nariño, podría ser el procedimiento expuesto en este documento ya que en este se explica de manera generalizada lo que se debe tener en cuenta a la hora de construir una cubierta vegetal.
- ✓ La propuesta debería ser reforzada con muros verdes para optimizar los beneficios para la Universidad Antonio Nariño Sede Sur.
- ✓ Se recomienda que si se desea mantener la zona de estudio se realicen estudios previos de la estructura del bloque 5, para evidenciar las condiciones de soporte para el techo verde.
- ✓ Finalmente se sugiere que a la propuesta de techo verde se adicione un panel solar y adicionalmente se plantee un balance energético el cuál puede apoyarse en una simulación, con el fin de identificar el ahorro o la contribución energética que se podría generar añadiendo un panel solar al techo verde.

11. Referencias

- Ávila Marchena, D. C. (2012). Techos Verdes Como Sistemas De Drenaje Sostenible. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/71419242.pdf>
- Baca Currea, G. (2005). Ingeniería-Económica-Guillermo-Baca-Currea.Pdf (pp. 43-53). pp. 43-53. Recuperado de <https://catedrafinancierags.files.wordpress.com/2014/09/ingenieria-economica-guillermo-baca-currea.pdf>
- Ballesteros, E. A., Montealegre, E. L., Zambrano, D. L., Ortíz, E. Y., & Arango, C. D. (2020). Informe Anual de Calidad del aire de Bogotá 2019 Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RMCAB. 1-201.
- Besir, A. B., & Cuce, E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(September 2017), 915-939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- Cardona Arango, K. C., & Bermúdez Zapata, V. (2019). Arbolado urbano como estrategia de gestión del aire. Universidad de Antioquia Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental Especialización en Gestión Ambiental Medellín, Colombia. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10495/15906>
- Catalano, C., Laudicina, V. A., Badalucca, L., & Guarino, R. (2018). Some European green roof norms and guidelines through the lens of biodiversity: Do ecoregions and plant traits also matter? *ELSEVIER*, 115, 15-26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.01.006>

Ecotelhado. (2020). Requerimientos generales de Diseño para un Techo Verde - - | Helecho Ecotelhado. Recuperado 19 de octubre de 2020, de <http://ecotelhado.com.co/techo-verde/>

García Buitrago, N. (2014). Guía Práctica Techos Verdes Y Jardines Verticales Una Piel Natural Para Bogotá (pp. 1-48). pp. 1-48. Recuperado de https://www.academia.edu/23114762/GUÍA_PRÁCTICA_SECRETARÍA_DISTRITAL_DE_AMBIENTE

Google Maps. (2020a). Rafael Uribe Uribe. Recuperado 23 de noviembre de 2020, de <https://www.google.com/maps/place/Rafael+Uribe+Uribe,+Bogotá/@4.5660612,-74.1301808,14z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8e3f98b78f49de33:0xd61bc7317575ff64!8m2!3d4.5762835!4d-74.1173688?hl=es>

Google Maps. (2020b). Universidad Antonio Nariño Sede Sur - Google Maps. Recuperado 19 de octubre de 2020, de <https://www.google.com/maps/place/Universidad+Antonio+Nariño+Sede+Sur/@4.579247,-74.1021777,1114m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x8e3f98dd7cdc161d:0x1a982dac35fd7d7d!8m2!3d4.579247!4d-74.099989>

Hamouz, V., & Muthanna, T. M. (2019). Hydrological modelling of green and grey roofs in cold climate with the SWMM model. *Journal of Environmental Management*, 249(August), 109350. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109350>

Limón Bandola, E. M. L. B. (2011). Análisis del comportamiento térmico, beneficios y costos, de dos tipos de techos verdes en sistema modular, en Poza Rica, Veracruz. 1-60. Recuperado de

<https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/46427/QuirozCortesMCarmen.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

López Uceda, A., Galvín, A. P., Ayuso, J., Jiménez, J. R., Vanwalleghem, T., & Peña, A. (2018). Risk assessment by percolation leaching tests of extensive green roofs with fine fraction of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(36), 36024-36034. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1703-1>

Manso, M., Teotónio, I., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2020). Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135(November 2019). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111>

Nagase, A. (2020). Novel application and reused materials for extensive green roof substrates and drainage layers in Japan – Plant growth and moisture uptake implementation -. *Ecological Engineering*, 153(April), 105898. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105898>

Nieto Escalante, J. A. (2011). *Guía_De_Techos_Verdes_2011.Pdf* (pp. 1-87). pp. 1-87.

Noticias de Taiwán. (2014). LA CONSTRUCCION DE UNA VISION VERDE - Noticias de Taiwán. Recuperado 19 de octubre de 2020, de <https://noticias.nat.gov.tw/news.php?post=88373&unit=96,108,115>

Park, J., Kim, J. H., Dvorak, B., & Lee, D. K. (2018). The Role of Green Roofs on Microclimate Mitigation Effect to Local Climates in Summer. *International Journal of Environmental Research*, 12(5), 671-679. <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0124-9>

Peñalosa Londoño, E., Ortiz Gómez, A., Avendaño Arosemena, A. J., & Burbano Guzmán, L. C. (2017). San Cristóbal Localidad 04. Monografía 2017. Diagnóstico de los principales aspectos territoriales, de infraestructura, demográficos y socioeconómicos. Localidad 11., pp. 1-160.

Planificaci, D. E. (2020). Sistemas ZinCo para cubiertas verdes Beneficios de las cubiertas verdes (pp. 1-36). pp. 1-36. Madrid.

Ramírez, L. V. (2017). Encuentra información actualizada sobre el clima de la ciudad de Bogotá | Bogota.gov.co. Recuperado 25 de agosto de 2020, de <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/encuentra-informacion-actualizada-sobre-el-clima-de-la-ciudad-de-bogot>

Roggero, M. (2020). Social dilemmas, policy instruments, and climate adaptation measures: the case of green roofs. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25(4), 625-642. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09883-4>

ROMERO, D. S. (2013). VALORACIÓN DEL COSTO-BENEFICIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TECHOS VERDES: APLICACIÓN A UN CASO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ (UNIVERSIDAD DE LOS ANDES). Recuperado de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/19507/u670743.pdf?sequence=1>

SDA. (2012). Estas son las zonas más ruidosas en Bogotá - Archivo de noticias - Secretaría Distrital de Ambiente. Recuperado 25 de agosto de 2020, de http://ambientebogota.gov.co/web/sda/archivo-de-noticias/-/asset_publisher/5PPa/content/estas-son-las-zonas-mas-ruidosas-en-

bogota?redirect=http%253A%252F%252Fambientebogota.gov.co%252Fweb%252Fsd%252Farchivo-de-noticias%253Fp_p_id%253D101_INSTANCE_5PPa%2526p_p_lifecycle%253

SDA. (2020). Visor Ambiental. Recuperado 21 de noviembre de 2020, de <https://visorgeo.ambientebogota.gov.co/?lon=-74.102099&lat=4.579726&z=18&l=5:1%7C77:0.8>

Sechague Otálora, J. (2016). Revista Nova Et Vetera - - Universidad del Rosario. Recuperado 19 de octubre de 2020, de <https://www.urosario.edu.co/Revista-Nova-Et-Vetera/Vol-2-Ed-15/Omnia/Techo-Verde-UR-Participando-con-conciencia-ambient/>

Secretaría Distrital de Ambiente. (2015). Marco jurídico - Secretaría Distrital de Ambiente. Recuperado 19 de octubre de 2020, de <http://www.ambientebogota.gov.co/es/web/escombros/marco-juridico>

Secretaría Distrital de Ambiente. (2020). Ruido - Secretaría Distrital de Ambiente. Recuperado 10 de septiembre de 2020, de <http://ambientebogota.gov.co/ruido>

Secretaría Distrital De Medio Ambiente. (2020). APP Mapas Estratégicos de Ruido Distritales. Recuperado 26 de agosto de 2020, de <http://sdambiente.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=97a42ec6643645c89258d95a1a462c76>

Secretaría Distrital De Planeación. (2015). usospermitidos_16.pdf (p. 1). p. 1. Recuperado de http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/usospermitidos_16.pdf

Shafique, M., Luo, X., & Zuo, J. (2020). Photovoltaic-green roofs: A review of benefits, limitations, and trends. *Solar Energy*, 202(February), 485-497. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.101>

Sodangi, M. (2019). Building information modelling—Development and validation of implementation framework for improving performance of subcontractors. En *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 9). https://doi.org/10.1007/978-981-10-8016-6_31

Superintendencia De Industria Y Comercio. (2014). Boletín Cubiertas verdes by Superintendencia de Industria y Comercio - issuu. Recuperado 25 de agosto de 2020, de https://issuu.com/quioscosic/docs/boletin_cubiertas_verdes_marzo_31

Tang, M., & Zheng, X. (2019). Experimental study of the thermal performance of an extensive green roof on sunny summer days. *Applied Energy*, 242(June 2018), 1010-1021. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.153>

UPB Pontificia Universidad Bolivariana. (2015). Guía 4. Guía para el diseño de edificaciones sostenibles. Recuperado de https://www.metropol.gov.co/ambiental/Documents/Construccion_sostenible/Guia-4-GCS4EdificacionesSostenibles.pdf

Vida Sustentable XXI. (2017). Techos Verdes – Vida Sustentable XXI. Recuperado 19 de octubre de 2020, de <https://vidasustentablexxi.wordpress.com/category/techos-verdes/>

Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 740-752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>

Windy. (2020). Mapa Climático. Recuperado 11 de noviembre de 2020, de <https://www.windy.com/?4.649,-74.062,5>

Zhai, P., Zhou, B., & Chen, Y. (2018). A Review of Climate Change Attribution Studies. *Journal of Meteorological Research*, 32(5), 671-692. <https://doi.org/10.1007/s13351-018-8041-6>