

**ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE MUROS VERDES EN EL CAMPUS DOCTOR ANGÉLICO DE
LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS: EVALUACIÓN DE PLANTAS ORIENTADAS A
LA MEJORA DE LOS SISTEMAS DE DRENAJE PLUVIALES**

AUTOR: JUAN CAMILO AUNTA PEÑA

**DIRECTORA: INGENIERA PAOLA ANDREA HERNÁNDEZ MEJÍA
CODIRECTORA: INGENIERA DIANA PAOLA RAMÍREZ RODRÍGUEZ**

**LINEA DE RECURSO HIDRICO
MODALIDAD: PASANTIA**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
2025**

Resumen

La acelerada urbanización del siglo XXI ha intensificado problemáticas ambientales, económicos y sociales que amenazan la sostenibilidad urbana y el bienestar humano. Este fenómeno, caracterizado por la pérdida de áreas verdes, ha exacerbado el efecto isla de calor, la escorrentía superficial y la contaminación atmosférica. En este contexto, los muros verdes emergen como una estrategia sostenible para mitigar dichos impactos. Este estudio analizó la viabilidad técnica y económica de implementar muros verdes en el Campus Doctor Angélico de la Universidad Santo Tomás, en el marco del desarrollo sostenible.

Mediante un diagnóstico climático y estructural, se identificaron las terrazas occidentales del campus como zonas óptimas para su instalación. La metodología combinó cotizaciones de proveedores, la Transferencia de Beneficios (ajustada por Paridad de Poder Adquisitivo - PPA- e Índice de Precios al Consumidor -IPC-) para cuantificar monetariamente los servicios ecosistémicos, y un análisis financiero con los indicadores Valor Presente Neto (VPN) y Relación Beneficio-Costo (RBC), bajo un horizonte de 50 años y una tasa de descuento del 5,06%. Los resultados revelaron un VPN de \$9.083.792.482 COP y una RBC de 19,55, demostrando que por cada peso invertido se recuperan 19,55 pesos en beneficios socioambientales. En el análisis de sensibilidad, se proyectaron dos escenarios: uno con beneficios tangibles para la universidad y otro con reducción del 50% en los beneficios ambientales. El primero arrojó un VPN negativo, mientras que el segundo mostró rentabilidad positiva, destacando la dependencia del proyecto de la valoración de todos los servicios ecosistémicos y cómo se comporta frente a una reducción por la sobreestimación de beneficios. La implementación de muros verdes en el campus no solo es técnicamente viable, sino que potencia la calidad ambiental, fortalece la imagen institucional hacia la sostenibilidad y habilita oportunidades para certificaciones ambientales y programas de financiación en reverdecimiento urbano. Este estudio refuerza la importancia de integrar infraestructuras verdes en la planificación universitaria como mecanismo de resiliencia frente a los desafíos urbanos contemporáneos.

Palabras clave: Muros verdes, Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), Análisis Costo – Beneficio (ACB), eco-urbanismo, Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

Abstract

The accelerated urbanization of the 21st century has intensified environmental, economic, and social challenges that threaten urban sustainability and human well-being. This phenomenon, marked by the loss of green spaces, has exacerbated the heat island effect, surface runoff, and atmospheric pollution. In this context, green walls emerge as a sustainable strategy to mitigate these impacts. This study analyzed the technical and economic feasibility of implementing green walls at the Doctor Angélico Campus of Santo Tomás University, within the framework of sustainable development.

Through climatic and structural diagnostics, the western terraces of the campus were identified as optimal areas for installation. The methodology combined supplier quotations, Benefit Transfer (adjusted for Purchasing Power Parity -PPP- and Consumer Price Index -

CPI-) to monetize ecosystem services, and a financial analysis using Net Present Value (NPV) and Benefit-Cost Ratio (BCR) indicators, under a 50-year horizon and a 5.06% discount rate. The results revealed an NPV of \$9,083,792,482 COP and a BCR of 19.55, demonstrating that for every peso invested, 19.55 pesos are recovered in socio-environmental benefits. In the sensitivity analysis, two scenarios were projected: one with tangible benefits for the university and another with a 50% reduction in environmental benefits. The first yielded a negative NPV, while the second showed positive profitability, highlighting the project's dependence on the valuation of all ecosystem services and its vulnerability to overestimated benefits. The implementation of green walls on campus is not only technically viable but also enhances environmental quality, strengthens the institution's sustainability-oriented image, and enables opportunities for environmental certifications and urban greening funding programs. This study reinforces the importance of integrating green infrastructure into university planning as a resilience mechanism against contemporary urban challenges.

Key words: Green walls, Natural based Solutions (NbS), Cost – Benefits Analysis (CBA), eco-urbanism, Sustainable drainage systems (SuDs).

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS.....	2
2.1.	Objetivo general.....	2
2.2.	Objetivos específicos	2
3.	MARCO REFERENCIAL	2
3.1.	Marco Conceptual.....	2
3.2.	Marco Teórico.....	9
3.3.	Marco Legal.....	12
4.	DESARROLLO.....	13
4.1.	Revisión de literatura o bibliografía	13
4.2.	Evaluación de viabilidad técnica	15
4.2.1.	Análisis espacial del Campus Doctor Angélico.....	15
4.2.2.	Identificación y reconocimiento de la infraestructura existente.....	23
4.2.3.	Análisis de condiciones climáticas y ambientales de la zona.....	28
4.2.4.	Identificación de sistemas de muros verdes	38
4.2.5.	Identificación especies vegetales.....	38
4.3.	Evaluación de viabilidad económica	40
4.3.1.	Estudio de costos estimados	40
4.3.2.	Valoración de beneficios socio ambiental y económico.....	47
4.3.3.	Indicadores de viabilidad.....	56
5.	RESULTADOS.....	57
5.1.1.	Viabilidad técnica	57
5.1.2.	Viabilidad económica	63
6.	REFERENCIAS	71

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el crecimiento acelerado de la población mundial ha impulsado una expansión sin precedentes de las áreas urbanas. Actualmente, el 56% de la población global reside en ciudades, lo que ha generado una creciente demanda de recursos esenciales como agua, energía y suelo. Este proceso ha traído consigo impactos ambientales significativos, incluyendo el deterioro de ecosistemas, la contaminación del aire y del agua, y la reducción de áreas verdes, afectando la calidad de vida de las comunidades urbanas (ONU, s.f.). A medida que las ciudades continúan su crecimiento, se hace cada vez más evidente la necesidad de integrar soluciones sostenibles que permitan equilibrar el desarrollo urbano con la conservación de los recursos naturales. En este contexto, han surgido estrategias como las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), las cuales proponen el uso de procesos y estructuras naturales para abordar desafíos ambientales y urbanos. Estas soluciones han sido promovidas a nivel global como herramientas clave para la mitigación y adaptación al cambio climático, ofreciendo alternativas sostenibles para mejorar la calidad ambiental en las ciudades y fortalecer su resiliencia ante eventos extremos (ONU, s.f.).

La Universidad Santo Tomás en Colombia, consciente de estos desafíos, enfrenta la oportunidad de integrar infraestructuras verdes dentro de su desarrollo institucional. Actualmente, el Campus Doctor Angélico en Bogotá, busca ser referente en sostenibilidad, lo que representará un área de mejora en términos de gestión ambiental. En respuesta a esta necesidad, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica y económica de la implementación de muros verdes en este campus, analizando su potencial para optimizar la gestión hídrica, mejorar las condiciones ambientales y generar beneficios estéticos y educativos para la comunidad universitaria.

Para alcanzar este propósito, se realizará un análisis estructural del campus, una evaluación de las condiciones ambientales y una selección de especies vegetales adecuadas para este tipo de infraestructura. Asimismo, se llevará a cabo un análisis económico que permitirá cuantificar los costos y beneficios asociados a su implementación.

Los resultados de este estudio no solo servirán como base para futuros proyectos de infraestructura verde en la universidad, sino que también aportarán información clave para la planificación de estrategias sostenibles en entornos educativos, fortaleciendo el compromiso institucional con la sostenibilidad y la adaptación al cambio climático.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar la viabilidad técnica y económica de la implementación de muros verdes en el campus Dr. Angélico, a partir del uso de especies vegetales que contribuyan a la mejora de los sistemas de drenaje actuales.

2.2. Objetivos específicos

- Verificar las condiciones estructurales del campus para el soporte, drenaje y acceso para mantenimiento.
- Identificar y seleccionar especies vegetales capaces de reducir la presión en los sistemas de drenaje de aguas lluvia y que sean adecuadas para las condiciones específicas de la zona.
- Evaluar los beneficios económicos derivados de la implementación de muros verdes, para determinar la relación costo-beneficio del proyecto.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1. Marco Conceptual

Eco-urbanismo

“Se presenta como una estrategia fundamental para la planificación y desarrollo de ciudades sostenibles. Se define como el conjunto de decisiones y acciones orientadas a minimizar los impactos ambientales en entornos urbanos, asegurando un equilibrio entre lo natural y lo construido, y promoviendo el uso eficiente de los recursos” (Leal del Castillo Gabriel, 2010).

Esta perspectiva busca transformar los espacios urbanos en ecosistemas funcionales, donde la integración de la naturaleza en la infraestructura permita reducir la huella ambiental, mejorar la calidad del aire, optimizar la gestión del agua y fortalecer el bienestar social. Al fomentar la armonía entre el entorno construido y el medio natural, el eco-urbanismo contribuye a la resiliencia de las ciudades y al cumplimiento de los principios del desarrollo sostenible (Leal del Castillo Gabriel, 2010).

Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN)

Estrategias que aprovechan los procesos y ecosistemas naturales para enfrentar desafíos ambientales, como la adaptación al cambio climático, garantizando la conservación y restauración de los servicios ecosistémicos de manera sostenible.

Estas soluciones comprenden acciones dirigidas a la protección, gestión sostenible y recuperación de ecosistemas, con el fin de mitigar problemáticas que afectan a la sociedad, como el cambio climático, los desastres naturales, la seguridad alimentaria e hídrica, y la salud pública. Entre sus aplicaciones se incluyen la conservación y restauración de bosques, la protección de manglares y arrecifes de coral, la recuperación de humedales y la implementación de infraestructuras verdes en entornos urbanos.

Además, las SbN contribuyen a reducir el riesgo de desastres al abordar tres factores clave: la prevención y mitigación de amenazas, la disminución de la exposición de las comunidades a los riesgos y la reducción de su vulnerabilidad (IFRC).

Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

Sistemas que buscan mejorar la capacidad de infiltración de las ciudades mediante soluciones como pavimentos permeables, cunetas verdes y cuencas secas de drenaje, que facilitan la absorción del agua de lluvia y disminuyen la presión sobre los sistemas de alcantarillado convencionales. La implementación de SUDS en proyectos urbanos permite generar espacios de bioretención, que ayudan a minimizar los efectos adversos del cambio climático y mejoran la resiliencia de las ciudades frente a eventos climáticos extremos (Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría Distrital de Ambiente, 2020).

Muros verdes / jardines verticales

Los muros verdes han surgido como una estrategia clave en la promoción de ciudades sostenibles, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Este sistema consiste en la integración de vegetación en fachadas de edificaciones residenciales, comerciales o institucionales, brindando múltiples beneficios ambientales, sociales y económicos. Entre sus ventajas más destacadas se encuentran la revalorización del inmueble, la mejora paisajística, el apoyo a los sistemas de drenaje de aguas lluvias y la reducción del efecto isla de calor. Más allá de su impacto ambiental, los muros verdes favorecen la biodiversidad urbana, creando espacios propicios para insectos polinizadores, aves y otros organismos (Rivas Sánchez Yair Andres, 2019).

Los jardines verticales pueden clasificarse según distintos criterios, como el tipo de vegetación, la estructura portante, el sistema de riego o el sustrato utilizado. En este documento, se adopta la clasificación propuesta por Cárdenas (2021), en su trabajo final de grado, la cual se basa en la forma en que la vegetación se integra con la infraestructura. Según esta categorización, los muros verdes se dividen en dos tipos principales: directos e indirectos, como se ilustra en la imagen a continuación.

Ilustración 1. Clasificación de jardines verticales.

Jardines Verticales	[D] Directo	[DT] Tradicional		
		[DE] Estructural	[DE 1] Interno	
			[DE 2] Externo	
	[I] Indirecto	[IC] Continuo	[ICM] Modular	[ICM 1] Cajas
				[ICM 2] Bloques
				[ICM 3] Gavión
			[ICA] Adherido	
			[ICL] Lineal	[ICL 1] Vertical
				[ICL 2] Horizontal
				[ICL 3] Reticular
		[ID] Discontinuo	[ID 1] Individual	
			[ID 2] Colectivo	

Fuente: (Cárdenas, 2021)

a) Directo:

Este tipo de sistema de jardinería se basa en la interacción directa entre las especies vegetales y la infraestructura de la edificación, sin la presencia de elementos intermedios entre ambas.

- Tradicional: Este sistema se caracteriza por la plantación directa de la vegetación en el suelo o en contenedores ubicados en la base de la fachada, permitiendo que las especies utilicen el muro como soporte para su crecimiento. Se emplea tanto en dirección ascendente (desde la base del edificio hacia arriba) como descendente (desde una estructura elevada hacia abajo). Las especies más utilizadas en este sistema son plantas trepadoras, ya que presentan una mejor adaptación a superficies verticales.
- Estructural: Este sistema permite la integración directa de la vegetación en la estructura del edificio, favoreciendo su desarrollo sin necesidad de soportes adicionales.
 - Interno: La vegetación crece dentro de la fachada, utilizando materiales innovadores como el hormigón vegetal, un tipo de hormigón polímero poroso

que permite el crecimiento de plantas en su superficie o el muro directamente es la vegetación la cual aísla el predio del exterior.

- Externo: En este sistema, la vegetación envuelve el muro, creando una pantalla vegetal que recubre la estructura. Para ello, se emplean estructuras metálicas que sirven de soporte para el crecimiento de las plantas, formando una cubierta verde alrededor del espacio que protege.

b) Indirecto:

Los sistemas de jardinería indirectos son aquellos en los que la vegetación y la fachada están conectadas a través de un elemento intermedio, un soporte incrustado en el muro que sostiene las plantas.

- Continuo: Generan una imagen uniforme en la edificación, proporcionando una apariencia homogénea del material vegetal.
 - Modular: Utiliza módulos o paneles fijados mediante una subestructura al muro principal. Estos pueden estar hechos de distintos materiales y funcionan como maceteros para la plantación de especies. Existen tres formas principales de módulos: caja, bloque y gavión.
 - Adherido: Se basa en sistemas hidropónicos, por lo que no requiere sustrato. La vegetación recibe los nutrientes a través del riego, utilizando un medio inerte que permite el enraizamiento y el drenaje del agua.
 - Lineal: Sistema que se caracteriza por utilizar una subestructura normalmente metálica la cual va anclada a la pared de la edificación, el tipo de subestructura es basado en su orientación y como se desenvuelve en el edificio por lo que existen tres de estos; verticales, el elemento lineal está orientado verticalmente; horizontales el elemento lineal está orientado horizontalmente; reticular, el elemento lineal está formado por retículas.
- Discontinuo: Generan una imagen fragmentada en la edificación, sin una uniformidad en la distribución del material vegetal.
 - Individual: Consiste en elementos intermedios que contienen vegetación sin formar parte de la estructura del muro. Estos pueden ser macetas, contenedores u otros soportes que albergan una sola planta.
 - Colectivo: Similar al sistema individual, pero diseñado para contener más de una planta en un solo elemento.

Indicadores económicos

La estructuración y gestión de evaluaciones socioeconómicas de proyectos se realiza a través de la determinación de indicadores de rentabilidad financiera, los cuales permiten analizar la viabilidad económica de una inversión. (Centros de Estudios para la Preparacion y Evaluacion Socioeconomica de Proyectos, 2017). Entre los principales indicadores utilizados se encuentran:

- Valor Presente Neto (VPN)
- Relación Beneficio – Costo (RBC)

Para determinar si un proyecto es económicamente viable, es fundamental evaluar el retorno de los beneficios frente a la inversión inicial y los costos dinámicos que puedan presentarse a lo largo del tiempo.

El VPN es la suma de los beneficios netos futuros del proyecto, descontados a una tasa de interés relevante para llevarlos a un valor presente. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Valor Presente Neto (VPN)

$$VPN = \sum \frac{Bn - Cn}{(1 + d)^n} = \sum \frac{Bn}{(1 + d)^n} - \sum \frac{Cn}{(1 + d)^n}$$

Fuente: (Centros de Estudios para la Preparacion y Evaluacion Socioeconomica de Proyectos, 2017)

Donde,

VPN = Valor Presente Neto.

B = Beneficios obtenidos del proyectos en cada periodo

C = Costos obtenidos del proyecto en cada periodo

d = Tasa de descuento o costo de oportunidad del dinero.

n = Número de años del horizonte de evaluación.

El criterio de decisión se establece de la siguiente manera:

- Si $VPN > 0$, el proyecto es rentable y su ejecución es conveniente.
- Si $VPN = 0$, el proyecto es indiferente en términos de rentabilidad, ya que los ingresos igualan los costos.
- Si $VPN < 0$, el proyecto no es viable económicamente y debe ser rechazado.

Cuando se comparan diferentes alternativas de inversión, se priorizará la opción con el mayor VPN, ya que esta generará mayores beneficios económicos.

La Relación Beneficio-Costo (RBC) es un indicador que mide la rentabilidad de un proyecto en términos del bienestar social que genera. Se utiliza como criterio para evaluar si una alternativa es económicamente viable desde una perspectiva social.

Ecuación 2. Ecuación Relación Beneficio - Costo (RBC)

$$RBC = \frac{\sum \frac{Bn}{(1+d)^n}}{\sum \frac{Cn}{(1+d)^n}} = \frac{VPN \text{ beneficios}}{VPN \text{ costos}}$$

Fuente: (ANLA; MINAMBIENTE, 2017)

El criterio de decisión es el siguiente:

- $RBC > 1 \rightarrow$ El proyecto es rentable y genera beneficios netos para la sociedad.
- $RBC = 1 \rightarrow$ El proyecto se encuentra en el umbral de aceptación, es decir, los beneficios y costos se equilibran.
- $RBC < 1 \rightarrow$ El proyecto no es viable, ya que genera más costos que beneficios, lo que implica un deterioro en el bienestar social.

Este indicador es clave en la evaluación de proyectos, ya que permite cuantificar el impacto social y ambiental de la inversión, asegurando que los beneficios obtenidos justifiquen los costos asociados a su implementación y mantenimiento (ANLA; MINAMBIENTE, 2017).

Servicios ecosistémicos

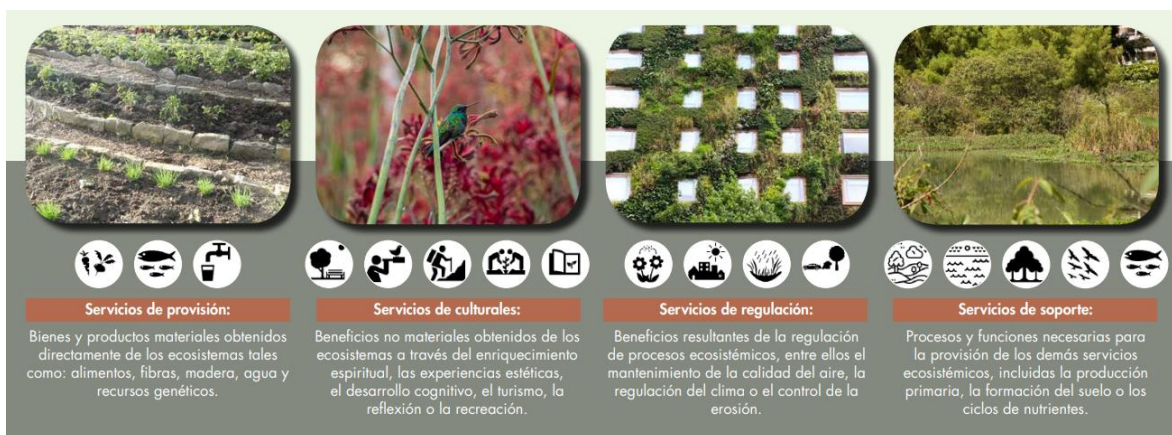
El reconocimiento de los beneficios que la naturaleza brinda a través de sus procesos ecosistémicos es fundamental para comprender la relación entre el entorno natural y la sostenibilidad ambiental y social. Estos beneficios se derivan de las funciones biológicas, físicas y químicas que los ecosistemas desempeñan, proporcionando servicios tanto directos como indirectos a la sociedad. Con el objetivo de identificar y valorar el impacto de los ecosistemas en los proyectos actuales, los servicios ecosistémicos han sido categorizados en cuatro grandes grupos:

- **Servicios ecosistémicos de apoyo:** Son aquellos que permiten el funcionamiento de los demás servicios ecosistémicos y sostienen la estabilidad de los ecosistemas. Incluyen la producción de oxígeno, la formación del suelo, el ciclo del agua y la fotosíntesis, entre otros.
- **Servicios ecosistémicos de regulación:** Contribuyen al mantenimiento del equilibrio ambiental mediante la regulación de procesos naturales. Entre estos se encuentran la regulación del clima y la calidad del aire, la polinización de cultivos, el control biológico de plagas y la regulación del flujo y calidad del agua.
- **Servicios ecosistémicos de aprovisionamiento:** Representan los beneficios tangibles que la naturaleza proporciona al ser humano. Dentro de esta categoría se encuentran la provisión de agua potable, alimentos, madera y otros recursos naturales esenciales.
- **Servicios ecosistémicos culturales:** Son aquellos beneficios intangibles que los ecosistemas brindan a la sociedad, relacionados con la identidad cultural, la

recreación y el bienestar emocional. Incluyen el valor estético del paisaje, el ecoturismo, la inspiración artística y la conexión espiritual con la naturaleza.

El reconocimiento e integración de estos servicios en los proyectos de infraestructura verde, como los muros verdes, permite maximizar sus beneficios ambientales y sociales, alineándolos con estrategias de desarrollo sostenible y resiliencia urbana (ONU, s.f.).

Ilustración 2. Clasificación de servicios ecosistémicos



Fuente: (MINAMBIENTE, 2017)

Transferencia de beneficios

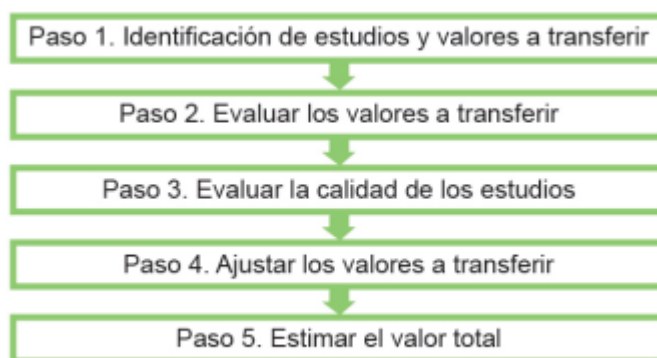
La transferencia de beneficios es una herramienta económica que permite trasladar estimaciones obtenidas a partir de estudios previos a un nuevo contexto, con el objetivo de calcular el valor monetario de los servicios ecosistémicos en ausencia de información específica o cuando el tiempo de análisis es limitado. Aunque no es una metodología de valoración en sí misma, facilita la aplicación de datos de estudios realizados en otras áreas para la evaluación de beneficios ambientales en un sitio determinado. La confiabilidad de los resultados depende en gran medida de la calidad de los estudios utilizados como referencia y de la similitud entre las áreas comparadas (ANLA; MINAMBIENTE, 2017). Para garantizar una correcta aplicación de la transferencia de beneficios, es necesario seguir los siguientes pasos:

- Definir el sitio de intervención:** Se debe establecer claramente el área de estudio, el bien o servicio ecosistémico a valorar y la población beneficiaria. Es fundamental que exista un grado de similitud con los estudios de referencia para asegurar una estimación precisa.
- Identificar estudios relevantes:** Se debe realizar una revisión bibliográfica que permita seleccionar investigaciones previas que hayan valorado el mismo tipo de servicio ecosistémico en contextos similares.
- Evaluar la aplicabilidad de los estudios:** La selección final de los estudios debe basarse en criterios como:

- Calidad y precisión de las estimaciones.
- Similitud en características geográficas y ambientales.
- Comparabilidad en términos de población beneficiaria y variables socioeconómicas.
- Tamaño del mercado del bien o servicio ambiental evaluado.
- Asignación de derechos de propiedad sobre el recurso analizado.

El uso adecuado de la transferencia de beneficios permite obtener estimaciones económicas confiables para la toma de decisiones, facilitando la justificación financiera de iniciativas en los proyectos, obras y actividades.

Ilustración 3. Paso a paso de metodología de transferencia de beneficios.



Fuente: (ANLA; MINAMBIENTE, 2017)

3.2. Marco Teórico

En la actualidad, América Latina y el mundo enfrentan crecientes desafíos ambientales derivados de la urbanización acelerada, la degradación de los ecosistemas y la mayor exposición a fenómenos climáticos extremos. Para hacer frente a esta problemática, los gobiernos han promovido estrategias que reduzcan la vulnerabilidad de los territorios y contribuyan al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En este contexto, las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) han cobrado relevancia como una alternativa efectiva para integrar medidas de adaptación y mitigación al cambio climático en el desarrollo urbano, mejorando tanto el bienestar humano como la resiliencia de las ciudades. Estas iniciativas buscan identificar áreas estratégicas para su implementación y desarrollar herramientas que faciliten su integración en la planificación territorial, maximizando la provisión de servicios ecosistémicos (ONU, 2020).

En Colombia, los jardines verticales más comunes en edificaciones corresponden a los sistemas presentados en la imagen siguiente. Esta clasificación, al igual que la anteriormente expuesta es basada en el comportamiento de la vegetación con la infraestructura y fue elaborada por la Secretaría Distrital de Ambiente en su guía de infraestructura vegetada, donde se evidencia de manera clara la interacción de estos sistemas con las edificaciones para poder dar de cuenta que los tipos de sistemas directos e indirectos.

En el caso de Bogotá, el régimen de lluvias, sumado a la acelerada urbanización y la impermeabilización del suelo debido al desarrollo de infraestructuras, ha generado un aumento en la escorrentía superficial. Esto ha ocasionado problemáticas como el colapso del sistema de alcantarillado, la formación de encharcamientos y el incremento del riesgo de inundaciones en zonas densamente construidas. Asimismo, la contaminación de los cuerpos hídricos que atraviesan la ciudad ha deteriorado la calidad ambiental y sanitaria, aumentando los costos asociados a la gestión del agua. En este contexto, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) han surgido como una alternativa eficiente para mitigar estos impactos, replicando los procesos naturales del ciclo hidrológico y reduciendo la huella ambiental de la infraestructura urbana (Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría Distrital de Ambiente, 2020).

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), estas soluciones permiten restaurar y preservar los servicios ecosistémicos, aprovechando los beneficios de la naturaleza para fortalecer la resiliencia de entornos urbanos y rurales. En particular, los muros verdes contribuyen a la regulación térmica, la reducción del efecto isla de calor, la captura de contaminantes y la gestión eficiente de aguas pluviales, promoviendo ciudades más habitables y sostenibles.

En el contexto de Bogotá, la falta de planificación estratégica en la integración de ecosistemas ha evidenciado diversas problemáticas ambientales. Por esta razón, el nuevo Plan de Ordenamiento Territorial (POT) considera las estructuras ecológicas como un eje central en la planificación urbana, promoviendo un desarrollo más armonioso con el entorno y resaltando la importancia de estrategias innovadoras para la sostenibilidad urbana (Alcaldía Mayor de Bogotá & Secretaría Distrital de Planeación, POT. Plan de Ordenamiento Territorial, Bogotá Reverdece 2022 - 2035. Decreto 555 de 2021, 2022).

A partir de este enfoque, los sistemas de infraestructura verde no solo contribuyen al desarrollo sostenible de las ciudades, sino que también funcionan como una red de interconexión entre ecosistemas urbanos y naturales. Esto facilita la integración de humedales, bosques y hábitats estratégicos, promoviendo la conectividad ecológica y la conformación de corredores verdes dentro de la ciudad. En este sentido, los muros verdes fortalecen la biodiversidad y mejoran la resiliencia urbana al proveer servicios ecosistémicos esenciales, consolidándose como una solución efectiva para la sostenibilidad urbana (Sierra Bautista & García Arévalo, 2018).

Además de tener importancia como estrategia dentro de la planificación, tiene también considerables beneficios a las estructuras y a los sistemas socioambientales y socioeconómicos, entre ellos Banoy y Osorio realizan una recopilación de los principales a ser valorados en cuanto a métodos de análisis costo beneficio (2021).

1) Beneficios Ambientales:

Reducción de la temperatura ambiente:

Los muros verdes disminuyen la transmisión del calor hacia el interior de los edificios, mejorando la estabilidad térmica y reduciendo la temperatura en las ciudades con un

promedio de hasta 2,5°C. Esto contribuye a mitigar el efecto de isla de calor al absorber la radiación solar para la fotosíntesis y crear una capa de aire térmicamente resistente entre el follaje y las paredes externas. Gracias a estas propiedades, los muros verdes han sido ampliamente implementados en entornos tropicales como una estrategia efectiva para mejorar el confort térmico y la eficiencia energética en edificaciones (Erdem, 2017).

Mejora de la calidad del aire:

Estos sistemas filtran partículas contaminantes y transforman el dióxido de carbono en oxígeno, contribuyendo a la reducción de la contaminación y la mejora de la salud pública. Según el estudio de Cárdenas (2021), 1 m² de jardín vertical puede extraer anualmente 2,3 kg de CO₂ y producir 1,7 kg de oxígeno. Existen sistemas de biofiltración pasivos y activos que pueden implementarse en muros verdes, donde la biofiltración pasiva permite la difusión de aire a través de la vegetación. A medida que las políticas ambientales avanzan hacia la descarbonización y la reducción de la huella de carbono, este tipo de soluciones multifuncionales podrían integrarse dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y las estrategias ambientales, sociales y de gobernanza (ESG) (James, Rene, Bilyaminu, & Chellam, 2024)

Reducción de la contaminación acústica:

Los muros verdes funcionan como barreras acústicas, atenuando el ruido tanto en espacios interiores como exteriores. Se ha demostrado que la vegetación ofrece una absorción sonora un 41% mayor en comparación con una fachada convencional. La capacidad de reducción del ruido varía según el espesor del jardín vertical, alcanzando hasta 8 dB de reducción, lo que equivale a disminuir a la mitad la contaminación acústica percibida (Cárdenas, 2021). En estudios cuantitativos, se encontró que una capa delgada de vegetación (20-30 cm) puede incrementar el aislamiento acústico en 1 dB para el ruido del tráfico y entre 2 dB (Muro Verde) y 3 dB (Fachada Verde) para el ruido rosa (Pérez, y otros, 2016).

Aumento de la biodiversidad:

Los muros verdes favorecen la presencia de avifauna, insectos y otras especies que encuentran en estos sistemas un hábitat adecuado, generando una zona de conexión ecosistémica. Esto proporciona oportunidades adicionales para que la flora y fauna prosperen en entornos urbanos, incrementando la conectividad ecológica y fortaleciendo los corredores verdes dentro de las ciudades (Tiago, Leal, & Silva, 2024).

Gestión del drenaje pluvial:

Estos sistemas contribuyen a la reducción de la escorrentía superficial y fomentan la evapotranspiración, lo que permite restaurar parcialmente los ciclos hidrológicos en entornos urbanos. Dependiendo del tipo de sustrato o medio de plantación utilizado, los muros verdes pueden ofrecer beneficios significativos en la retención de agua de lluvia. Sin embargo, aunque estos sistemas han demostrado reducir la escorrentía, aún no existen estudios concluyentes que cuantifiquen con precisión la cantidad de agua pluvial retenida por este tipo de infraestructura (Palermo, y otros, 2023).

2) Beneficios Sociales:

Mejora del bienestar:

La incorporación de vegetación en los espacios urbanos tiene un impacto positivo en la salud mental y la percepción del entorno. La presencia de áreas verdes reduce los niveles de estrés y mejora la sensación de confort, generando beneficios psicológicos que contribuyen al bienestar general de la población (Rivas Sánchez Yair Andres, 2019).

3) Beneficios Económicos:**Ahorro en consumo energético y mantenimiento:**

Los muros verdes reducen significativamente la necesidad de refrigeración en los edificios, lo que puede traducirse en hasta un 30% de ahorro en costos de climatización. Aunque la inversión inicial de un muro verde es aproximadamente un 15% mayor en comparación con un muro convencional, sus costos operativos y de mantenimiento permiten ahorros del 64% en consumo energético y 25% en reducción de costos de redecoración externa. Como resultado, el ahorro total en el ciclo de vida del muro verde puede alcanzar hasta un 45% en comparación con estructuras tradicionales (Madushika, Ramachandra, & Zainudeen, 2022).

Valorización del inmueble:

Las edificaciones que integran infraestructuras sostenibles, como los muros verdes, tienden a experimentar una mayor valorización en el mercado inmobiliario. Según la Commission for Architecture and the Built Environment (CABE), la incorporación de zonas ajardinadas puede incrementar el valor de una propiedad en un 7% (Franco Mateus Sergio Andrés, 2015). Asimismo, estudios realizados por Perini y otros indican que este aumento puede oscilar entre un 6% y un 15%, dependiendo de la ubicación y del nivel de integración del diseño ecológico en la edificación (Banoy Velásquez Catherine & Osorio Duarte Daniel David, 2021)

Estos beneficios posicionan a los muros verdes como una alternativa viable para mejorar la calidad de vida en entornos urbanos, reducir el impacto ambiental de las construcciones y generar ahorros económicos a largo plazo.

3.3. Marco Legal

En la actualización del Plan de Ordenamiento Territorial (POT); decreto 555 de 2021, se establecieron nuevas disposiciones normativas orientadas al reverdecimiento urbano, incorporando lineamientos específicos para fortalecer la sostenibilidad ambiental en la ciudad. Actualmente, se cuenta con diversos marcos normativos que respaldan este enfoque:

El Decreto 555 de 2021, a través del Artículo 117: Política Distrital de Ecurbanismo y Construcción Sostenible, introdujo nuevas disposiciones que reemplazaron las normativas definidas en el Decreto 566 de 2014, la Resolución 1319 de 2015 y el Decreto Distrital 613 de 2015. En este artículo, se establece que la Administración Distrital, dentro de los 12 meses siguientes a la entrada en vigencia del POT, debía adoptar un decreto reglamentario sobre ecourbanismo y construcción sostenible (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Secretaría Distrital de Planeación, 2021).

En cumplimiento de esta disposición, y con la colaboración de las secretarías de Planeación, Ambiente y Hábitat, en diciembre de 2023 se expidió el Decreto 582 de 2023, el cual establece lineamientos para el reverdecimiento urbano a través del ecourbanismo. Este decreto se sustenta en documentos técnicos clave, entre ellos:

- Manual de Ecourbanismo y Construcción Sostenible.
- Documento Técnico de Soporte.
- Cartilla de Ecobarrios.

Adicionalmente, la Resolución 3654 de 2014 de la Alcaldía Mayor de Bogotá constituye un documento fundamental dentro del marco del ecourbanismo en la ciudad. Esta resolución establece directrices para fomentar un desarrollo urbano sostenible e integrar espacios verdes en la planificación urbana, maximizando sus beneficios ambientales y recreativos. Según su definición, “La resolución tiene por objeto crear y regular el programa de reconocimiento ambiental ‘Bogotá Construcción Sostenible’ para proyectos que implementen estrategias de ecourbanismo y/o construcción sostenible en el perímetro urbano del Distrito Capital” (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2014).

4. DESARROLLO

4.1. Revisión de literatura o bibliografía

La evaluación del proyecto en el campus Doctor Angélico tiene como objetivo analizar las condiciones técnicas y económicas necesarias para la instalación de muros verdes. Para ello, se requiere una revisión exhaustiva de la literatura que permita identificar los criterios técnicos adecuados y establecer una correlación precisa entre los costos asociados a este tipo de infraestructura y los beneficios ambientales que proporciona.

Dado que la transferencia de beneficios será empleada como herramienta económica para deducir resultados de estudios previos a este contexto específico, es fundamental definir márgenes de referencia y establecer categorías clave que orienten la revisión bibliográfica. En este sentido, las referencias utilizadas en el proyecto han sido organizadas en categorías específicas alineadas con sus objetivos, permitiendo una estructura más clara para el análisis y la justificación del estudio.

Categorías temáticas propuestas:

- Evaluación económica y financiera: Incluye los principales indicadores económicos que fueron utilizados como herramienta o criterio de inversión, tales como el VPN (Valor Presente Neto) y la TIR (Tasa Interna de Retorno). Asimismo, se analizaron artículos y proyectos relacionados en los que se evidenció un Análisis Costo-Beneficio aplicado a proyectos ambientales, así como metodologías de evaluación económica que fortalecieron el estudio de los muros verdes.

- **Transferencia de beneficios:** Esta categoría agrupa los principales métodos de valoración económica no directa, los cuales reforzaron el análisis del proyecto, en particular para la estimación de los beneficios asociados. Para ello, se incluyeron referencias de otros proyectos exitosos en condiciones similares, con especial énfasis en estudios de caso aplicados a infraestructura verde y la estimación de beneficios ambientales mediante transferencia de beneficios.
- **Infraestructura verde y desarrollo sostenible:** Esta categoría se centra en el análisis de la implementación de muros verdes en entornos urbanos, respaldado por estudios que permitieron identificar las problemáticas que podrían surgir durante su desarrollo, así como los beneficios ambientales y sociales derivados de su ejecución. También se abordaron las contribuciones de la infraestructura verde al desarrollo sostenible de espacios educativos y urbanos, basándose en políticas recientes que promueven este tipo de proyectos como herramientas para gestionar los retos climáticos de las ciudades.
- **Diseño y operación de infraestructura verde:** Incluye las principales evaluaciones técnicas relacionadas con los sistemas de muros verdes, como el diseño, los materiales y las tecnologías aplicadas. Además, se analizaron especies vegetales óptimas identificadas en estudios con condiciones similares, considerando su potencial para mejorar los sistemas de drenaje pluvial. También se abordaron los costos de implementación y mantenimiento comunes en el mercado, con el objetivo de sustentar el análisis de costos del proyecto. Finalmente, se evaluó la durabilidad y el rendimiento técnico esperado de las empresas encargadas de la instalación.

Las categorías nos limitan la búsqueda de diversas referencias para poder encaminar el proyecto de mejor manera y junto con estas diversas categorías se resaltaron palabras claves a raíz de las mismas, las cuales se utilizaron en la búsqueda de información por medio de la plataforma de Scopus, junto con operadores booleanos, con el fin de limitar los resultados del análisis y de esa manera obtener ecuaciones con las cuales podemos interactuar en el buscador y lograr recopilar referencias que logren darle sustento al proyecto.

- **Evaluación económica y Transferencia de beneficios**
 ("green walls" OR "vertical gardens") AND ("Cost-benefit analysis" OR "CBA")
- **Muros verdes y beneficios ambientales.**
 ("green walls" OR "vertical gardens") AND ("environmental benefits" OR "ecosystem service")
- **Diseño y operación de muros verdes**
 ("green walls" OR "vertical gardens") AND ("design" OR "construction" OR "layout")

Con estos operadores, se llevó a cabo la búsqueda bibliográfica a través de la plataforma Scopus, permitiendo la identificación y análisis de los componentes clave relacionados con la infraestructura verde. A partir de esta revisión, se construyó una base sólida que respalda las características esenciales del proyecto, facilitando la identificación de estudios relevantes y actualizados.

Este proceso no solo permitió establecer un panorama amplio sobre la evolución del conocimiento en torno a los muros verdes, sino que también posibilitó la transferencia de beneficios, seleccionando los valores cuantificables más óptimos dentro de las referencias disponibles.

4.2. Evaluación de viabilidad técnica

4.2.1. Análisis espacial del Campus Doctor Angélico

La caracterización del área del proyecto constituye un paso esencial en la evaluación de la viabilidad para la implementación de muros verdes en el Campus Doctor Angélico de la Universidad Santo Tomás. Este análisis permite identificar los beneficios ambientales, sociales y económicos que dichas infraestructuras pueden ofrecer, así como las problemáticas que podrían surgir durante su instalación, operación y mantenimiento. A partir de esta caracterización, se seleccionaron las áreas más adecuadas para la implementación de muros verdes, considerando factores técnicos, ambientales y la disponibilidad espacial actual.

El propósito de este análisis es garantizar que el proyecto se desarrolle en condiciones óptimas que maximicen su impacto positivo y aseguren su sostenibilidad a largo plazo. Además, los resultados obtenidos permitieron argumentar la viabilidad técnica y ambiental de esta infraestructura verde, alineándose con las políticas urbanas y de sostenibilidad vigentes en Bogotá, como el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) "Bogotá Verdece".

Adicionalmente, este análisis incluye una evaluación preliminar de las especies vegetales más adecuadas para las condiciones locales, teniendo en cuenta factores como el clima, los beneficios asociados y las necesidades de mantenimiento. Este enfoque permitió orientar el diseño hacia soluciones sostenibles que optimicen el sistema de drenaje pluvial y contribuyan a problemáticas actuales en el campus doctor angélico.

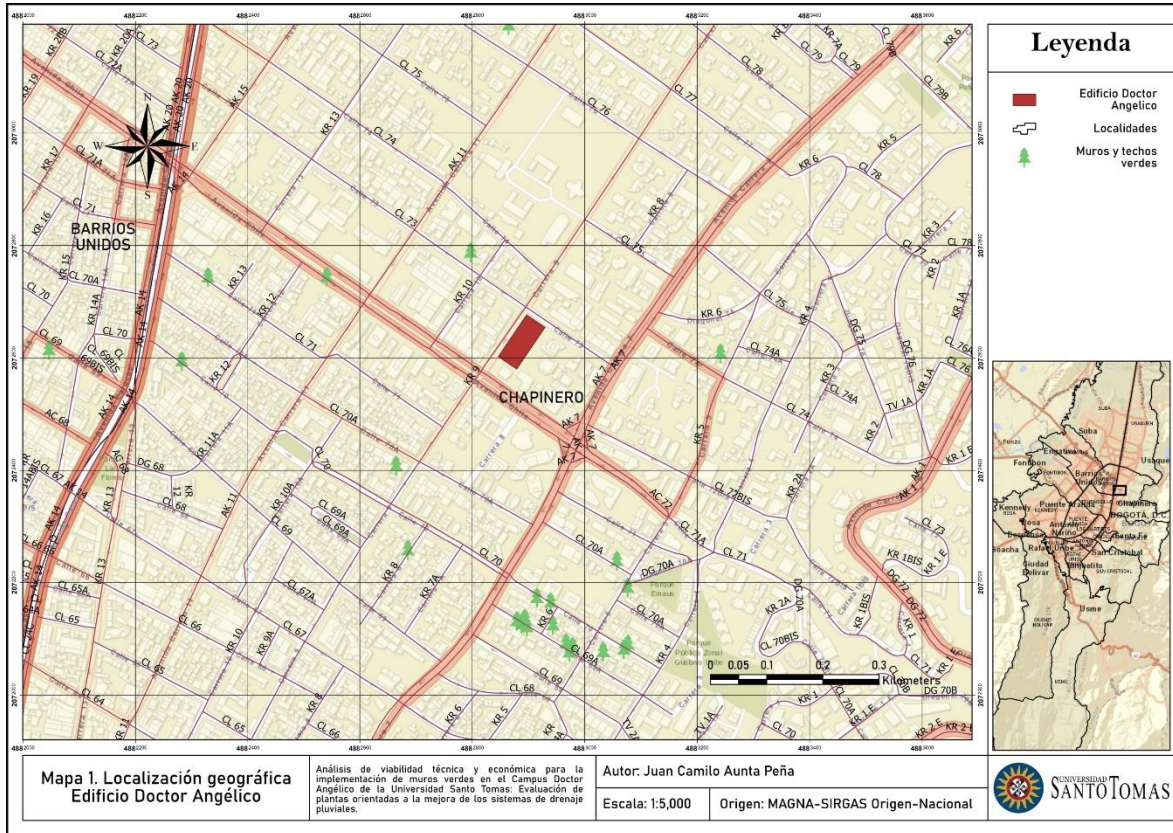
Descripción del área de estudio

El Campus Doctor Angélico de la Universidad Santo Tomás está estratégicamente ubicado en la intersección de la carrera 9 con calle 73, en el barrio El Nogal, de la localidad de Chapinero en Bogotá. Este campus se encuentra rodeado de importantes zonas económicas y urbanas que dinamizan su entorno inmediato. A menos de 500 metros se encuentra la Zona G, reconocida por su destacada oferta gastronómica, que incluye una amplia variedad de restaurantes, cafeterías y bares que atraen tanto a locales como a turistas. Hacia el occidente se ubica la Avenida Chile, un relevante centro financiero y comercial que alberga edificios de oficinas, bancos y el Centro Comercial Avenida Chile, contribuyendo significativamente a la actividad económica de la zona.

El edificio Doctor Angélico consta de una infraestructura diseñada para satisfacer las necesidades operativas y académicas de la universidad. Cuenta con 13 niveles sobre el nivel del suelo y 3 niveles subterráneos. Los niveles subterráneos están destinados principalmente al acceso y parqueo de vehículos, gestionados en convenio con la empresa Parking, encargada de garantizar la seguridad y operación de estos espacios. Como parte de este acuerdo, se dispone de bici parqueaderos gratuitos para los estudiantes, además de parqueaderos exclusivos para directivos. Estos niveles también albergan zonas esenciales para el funcionamiento interno, como áreas de almacenamiento de residuos sólidos, espacios destinados al resguardo de productos químicos, materiales de construcción e insumos. Asimismo, incluyen instalaciones para tanques de almacenamiento de aguas lluvia, aguas residuales y agua potable, junto con sus sistemas de bombeo.

En los 13 niveles superiores se desarrollan exclusivamente actividades académicas y administrativas. Estos pisos incluyen una variedad de espacios diseñados para fomentar el desarrollo integral de la comunidad universitaria, como cafeterías, zonas de descanso, aulas de clase y laboratorios especializados. Además, el edificio cuenta con auditorios, capilla, oficinas administrativas, áreas de trabajo académico, una biblioteca y otros espacios dedicados a actividades estudiantiles y académicas. Este entorno privilegiado y cuidadosamente diseñado refuerza el papel del campus como un espacio emblemático para el aprendizaje, la innovación y la interacción entre los miembros de la comunidad universitaria.

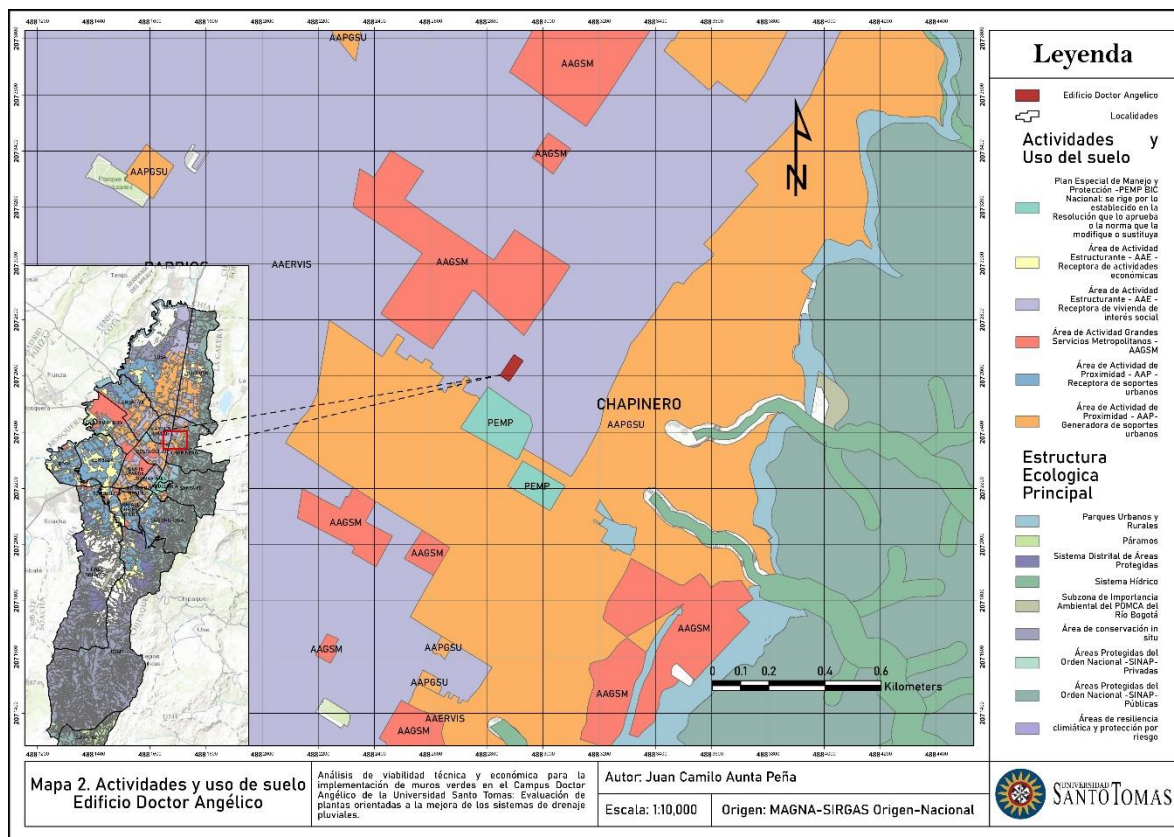
Ilustración 4. Mapa ubicación de Campus Edificio Doctor Angelico



Fuente: Elaboración propia..

Según el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) vigente, esta sede se encuentra clasificada como un Área de Actividad Estructurante (AAE), específicamente designada como zona receptora de vivienda de interés social (VIS). Esta clasificación, establecida en el POT, tiene como objetivo incentivar el desarrollo de proyectos habitacionales de interés social en zonas con altos costos de suelo, ubicadas cerca de corredores de transporte masivo y centros de empleo (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Secretaria Distrital de Planeación, 2021).

Ilustración 5. Mapa de actividades y uso de suelos Campus Edificio Doctor Angélico



Fuente: Elaboración propia.

El hecho de que el Campus Doctor Angélico esté ubicado en un Área de Actividad Estructurante receptora de VIS presenta una oportunidad significativa para alinear el proyecto de muros verdes con las políticas de sostenibilidad urbana y equidad social. Estas infraestructuras verdes no solo contribuirán al manejo eficiente del agua pluvial y la regulación térmica del edificio, sino que también complementarán los objetivos del nuevo POT el cual va encaminado al reverdecimiento urbano integral, que incluya propuestas basadas en la naturaleza (SbN), como lo pueden ser los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), infraestructura verde, entre otros, los cuales mejoren la calidad ambiental de una zona prioritaria para el desarrollo urbano y así mismo aumenten la habitabilidad y el bienestar de los usuarios del campus y su entorno, además, realizando prácticas sostenibles que puedan replicarse en futuros desarrollos habitacionales.

Evaluación de áreas potenciales

Un proyecto de muros verdes debe cumplir con criterios técnicos y estructurales adecuados, pero también es fundamental identificar cuidadosamente las áreas del edificio donde esta infraestructura pueda generar el mayor impacto social, ambiental y económico. Con este propósito, se realizó un análisis en campo con el acompañamiento del equipo de mantenimiento de la universidad y de la ingeniera ambiental Diana Ramírez. Este proceso permitió identificar los espacios más idóneos para abordar problemáticas específicas, como

el drenaje inadecuado de aguas pluviales y el calor intramural generado por el diseño actual del edificio. Además, se anticiparon posibles limitaciones que podrían surgir durante las etapas de ejecución, monitoreo y mantenimiento del proyecto.

En la inspección preliminar realizada en el edificio Doctor Angélico, se excluyeron las áreas subterráneas y los espacios intramurales de los 12 primeros pisos. Esta decisión se basó en el objetivo principal del proyecto, que busca implementar muros verdes que contribuyan a la mejora de los sistemas de drenaje actuales, una función que requiere espacios exteriores expuestos a condiciones ambientales.

Para seleccionar el área más adecuada para la instalación de los muros verdes, se tomaron en cuenta los siguientes criterios técnicos:

- Superficie disponible.
- Exposición a luz solar y pluvial.
- Viabilidad estructural.
- Accesibilidad para instalación y mantenimiento.
- Impacto ambiental y funcionalidad interna.
- Factibilidad económica.

A continuación, se presenta un resumen de las áreas evaluadas, con el apoyo del área de gestión ambiental para valorar las áreas disponibles.

- **Terraza del décimo tercer piso**

Este espacio cuenta con una amplia área que ofrece diversas posibilidades de intervención, recibe una gran cantidad de luz solar y se encuentra ampliamente expuesto a las condiciones climáticas de la ciudad. La azotea está rodeada de cristal, lo que proporciona vistas privilegiadas de la ciudad y de los cerros orientales de Bogotá. Sin embargo, esta característica presenta una limitación importante, ya que carece de suficientes superficies verticales adecuadas para la instalación de muros verdes. La mayoría de los muros disponibles se encuentran en los costados norte y sur, lo que reduce significativamente el potencial del proyecto en esta área, a pesar de que su estructura impermeabilizada y las condiciones generales del espacio sean óptimas para varios tipos de infraestructuras verdes.

El acceso a la azotea es favorable tanto para la instalación como para el mantenimiento, lo que haría viable la ejecución de un proyecto en este lugar. No obstante, los beneficios asociados a la reducción de ruido y la regulación térmica intramural, que son características clave de los muros verdes, no serían relevantes en esta ubicación, ya que los muros no están conectados con aulas, oficinas u otros espacios cerrados que presenten estas problemáticas. Por otro lado, beneficios como el drenaje adecuado de aguas pluviales y la mejora del paisaje en las instalaciones de la universidad sí son aplicables, aunque con ciertas limitaciones debido a las características del espacio.

Ilustración 6. Terraza decimo tercer piso



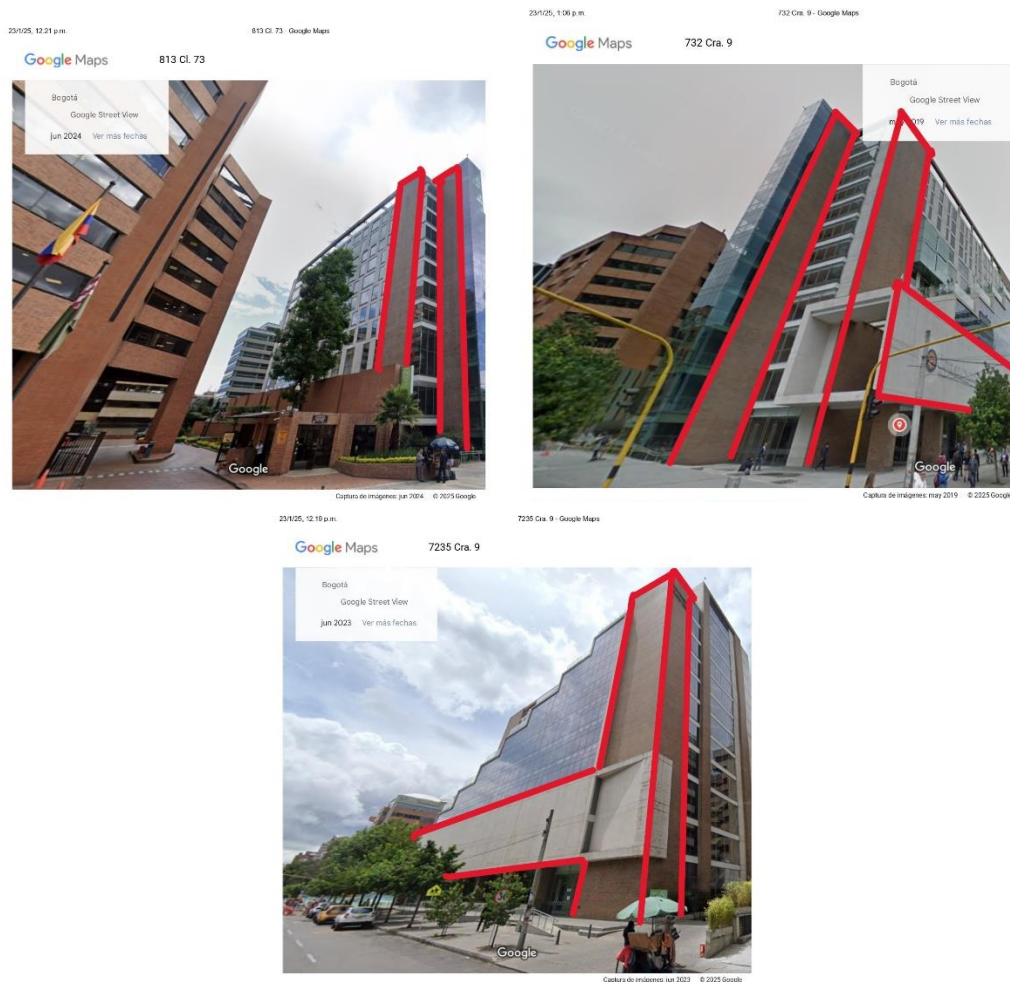
Fuente: (Universidad Santo Tomas, s.f.)

- **Muros exteriores del edificio**

Las superficies exteriores del edificio ofrecen un amplio espacio para la instalación de muros verdes, presentando una estructura que, a simple vista, parece adecuada para soportar el peso de este tipo de infraestructuras y cuenta con la capa de impermeabilización necesaria. Estas superficies, están expuestas a una excelente recepción de luz solar y aguas pluviales, poseen un fuerte potencial para maximizar beneficios ambientales como el drenaje eficiente de aguas pluviales, el aumento del valor paisajístico del entorno urbano y la regulación térmica intramural, entre otros.

Sin embargo, a pesar de estas ventajas, la implementación de muros verdes en esta área enfrenta una limitación significativa, los altos costos asociados a las condiciones específicas de los muros exteriores. La ejecución del proyecto requeriría la contratación de personal especializado y el uso de andamios y equipos para trabajo en alturas, lo que incrementaría sustancialmente el presupuesto inicial. Además, las complejidades asociadas al mantenimiento a largo plazo en estas condiciones harían que la sostenibilidad económica del proyecto sea difícil de garantizar, comprometiendo su viabilidad general.

Ilustración 7. Costado nororiental, noroccidental y suroccidental exterior del Edificio Doctor Angelico



Fuente: (Google, 2024)

- **Espacio oriental del primer piso (área cercana a la cafetería)**

Este espacio abierto funciona como una sala de descanso para el personal dentro de la universidad, su ubicación es justo el oriente del edificio y al lado del área de cafetería, en esta área permanece un flujo de gente considerable lo que podría significar unos beneficios socio ambientales significativos, la disponibilidad de luz solar tiene ciertas limitaciones pues los muros colindantes junto con el edificio estaría perjudicando de forma considerables el acceso de esta, sin embargo está expuesto a las condiciones climáticas normales con ciertas particularidades en el tránsito de vientos predominantes.

La particularidad de esta área potencial tiene que ver con el espacio en donde se piensa realizar, ya que los muros que se encuentran en la estructura frente a la cafetería corresponden a una edificación ajena a la universidad, lo que implicaría la necesidad de gestionar permisos especiales para cualquier intervención. Esta situación no solo podría generar retrasos significativos, sino también aumentar los costos del proyecto, afectando su viabilidad y además los beneficios que recibiría la universidad, debido a que la recepción del calor intramural y de ruido directamente estaría beneficiando al edificio contiguo.

Como se puede observar en la imagen, el jardín y las sillas de madera instaladas por la universidad están ubicados directamente junto a la pared del edificio vecino, lo que refuerza las limitaciones de uso del espacio y las dificultades logísticas que podrían surgir en las etapas de implementación y mantenimiento.

Ilustración 8. Espacio oriental del primer piso



Fuente: (Universidad Santo Tomas, s.f.)

- **Terrazas occidentales del edificio**

Las terrazas del edificio Doctor Angélico, ubicadas al occidente del campus, son espacios abiertos que cuentan con acceso directo a luz solar y condiciones climáticas favorables. Estos espacios están diseñados para la relajación de los estudiantes y permiten interactuar con el entorno exterior. Cada terraza está delimitada por cristales y cuenta con un muro en el costado sur, el cual conecta con aulas del edificio.

El muro sur de estas terrazas se ha identificado como un área óptima para la instalación de infraestructuras verdes debido a sus condiciones estructurales adecuadas para soportar el peso de las plantas y la impermeabilización necesaria para evitar filtraciones. Además, al ser un área accesible y descubierta, se facilita tanto la instalación como el mantenimiento de los muros verdes sin complicaciones adicionales.

La conexión interna de estos muros con las aulas permitirá generar diversos beneficios ambientales, como la reducción del ruido, la mejora de la regulación térmica en los espacios interiores y una contribución significativa a la estética del campus. El análisis de estos beneficios, junto con la simplicidad en su mantenimiento y la baja inversión inicial, posiciona este proyecto como una opción con alta viabilidad financiera.

Ilustración 9. Terrazas occidentales



Fuente: (Universidad Santo Tomás, s.f.)

Para seleccionar el área más adecuada para la instalación de muros verdes, se llevó a cabo un análisis cualitativo basado en las observaciones obtenidas durante las visitas técnicas. Este análisis permitió evaluar cada zona según su idoneidad para la implementación del proyecto, utilizando una escala de tres niveles:

- Alta: El área cumple plenamente con el criterio y ofrece condiciones óptimas para la instalación.
- Media: El área cumple parcialmente con el criterio, aunque podría requerir ciertos ajustes o presenta limitaciones menores.
- Baja: El área no cumple con el criterio o presenta restricciones significativas que afectan su viabilidad.

Tras esta evaluación, se identificaron las áreas con mayor puntuación en los diferentes criterios, lo que permitió seleccionar la zona más adecuada para la realización del estudio de viabilidad técnica.

4.2.2. Identificación y reconocimiento de la infraestructura existente

Descripción de la infraestructura existente

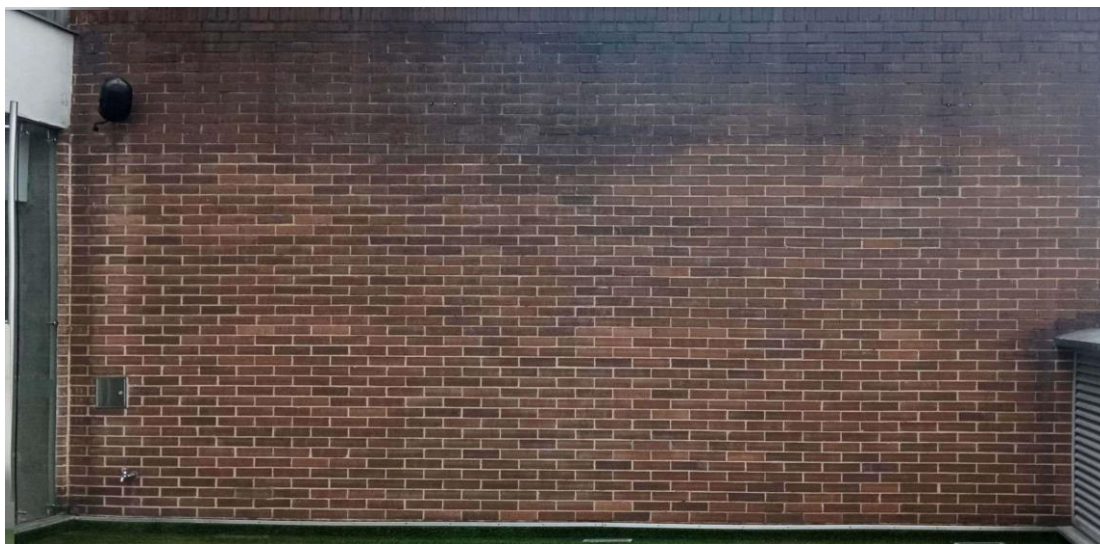
El edificio Doctor Angélico cuenta actualmente con siete terrazas al aire libre, accesibles para los estudiantes. Estas terrazas están distribuidas en forma escalonada, desde el quinto piso hasta el undécimo, como se muestra en la imagen 8 en la evaluación de áreas potenciales. Durante las visitas de inspección, se evaluó que los muros comprendidos entre el quinto y el décimo piso a simple vista están constituidos de bloques de concreto, por lo que se alcanzan

a visualizar las juntas entre estos. En su costado exterior, cuentan con un vidrio reforzado que permite la vista hacia la carrera novena, mientras que en el lado opuesto se encuentra la puerta de ingreso, también en vidrio reforzado. Además, en el costado izquierdo de cada terraza, se identificaron elementos instalados en el muro, como parlantes, válvulas y grifos de agua, los cuales deben considerarse en el diseño y planificación del sistema de muros verdes.

El muro del piso 11 está compuesto por una estructura de ladrillo y mantiene condiciones similares a las de los niveles inferiores. Sin embargo, en este último nivel, se encuentra un sistema de ingreso de aire en el costado derecho, cuya función es regular la ventilación de los salones ubicados en el costado occidental del edificio, justo debajo de las terrazas. Todos estos aspectos, junto con las áreas de estudio y zonas adyacentes relevantes para el proyecto, fueron documentados mediante fotografías tomadas durante las inspecciones realizadas. Dichas imágenes pueden consultarse en el documento principal y en el Anexo 8: Fotografías del proyecto.

Ilustración 10. Fotografías de muros actuales del edificio doctor angélico





Fuente: Elaboracion propia

Como se observa en la imagen anterior, la mayoría de las fotografías de los muros exteriores fueron tomadas bajo condiciones de lluvia, con el propósito de analizar el patrón de humectación de las superficies. A partir de esta inspección, se determinó que aproximadamente el 90% de la superficie de los muros se humedece durante las precipitaciones, el doctor angélico es una infraestructura que se considera como nueva, por lo que actualmente en sus muros no se denotan grietas u otras consideraciones técnicas a tener en cuenta, lo que resalta la necesidad de considerar estrategias de impermeabilización y drenaje en la implementación de los muros verdes para poder cuidar la integridad de los muros evitando filtraciones y acumulación de humedad en la estructura.

El piso de las terrazas está construido en concreto con una capa impermeabilizante y recubierto con pasto sintético. En uno de los costados, se han habilitado pequeñas áreas para la siembra de plantas, con el objetivo de aportar volumen al diseño y reducir la sensación de espacios abiertos sin vegetación. El sistema de drenaje se encuentra ubicado en el centro de las terrazas y cuenta con rejillas de filtración, diseñadas para canalizar el agua lluvia mientras retienen materiales de gran tamaño, evitando el taponamiento del sistema. El agua recolectada es dirigida hacia un tanque de almacenamiento en el sótano del edificio y posteriormente conducida al sistema de acueducto, asegurando su correcta disposición y reduciendo el riesgo de acumulación en la superficie.

Ilustración 11. Fotografía del área de las terrazas



Fuente: Elaboracion propia

Con el acompañamiento de la ingeniera Diana Ramírez, se realizó la medición de las áreas disponibles, los muros seleccionados tienen un ancho aproximado de 7 metros, considerando que los vidrios exteriores ocupan una franja de la estructura, lo que requiere especial precaución al momento de realizar intervenciones en la zona. En cuanto a la altura del muro, esta es de 3.6 metros, lo que permite establecer un área bruta de 25.2 m² para la instalación de muros verdes, sin descontar el espacio ocupado por los vidrios, parlantes y el sistema de grifería. No obstante, esta área puede variar según las especificaciones técnicas del proveedor y las condiciones estructurales del espacio, por lo que será necesario realizar una validación final antes de la instalación. Dicha validación será llevada a cabo por un ingeniero civil encargado de auditar la obra, quien revisará los planos estructurales y las características del muro para asegurar que la infraestructura cumpla con todos los requerimientos técnicos y normativos antes de su implementación.

Problemáticas estructurales identificadas

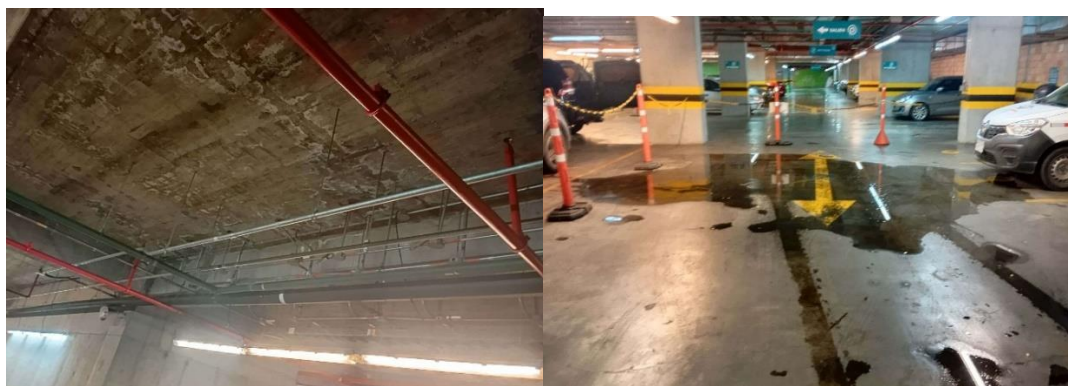
La infraestructura del Campus Doctor Angélico se caracteriza por su diseño moderno e innovador; sin embargo, tras una serie de inspecciones técnicas, se identificaron hallazgos que podrían comprometer la integridad del edificio y el bienestar institucional. Con el propósito de detectar problemáticas preexistentes que refuercen la justificación del proyecto y permitan anticipar desafíos estructurales asociados al montaje de jardines verticales, se llevó a cabo una visita técnica en un día de alta pluviometría. Durante esta inspección, se identificaron consideraciones estructurales clave que deben ser evaluadas en el proceso de implementación del proyecto.

El principal hallazgo detectado fue la presencia de problemas de infiltración de aguas pluviales en diversas áreas del edificio. Para ello, se realizó una revisión exhaustiva de toda la infraestructura, sin limitarse exclusivamente al área de intervención del proyecto.

- En el sótano 1, se identificaron problemas de humedad en el techo, además de filtraciones en la pared norte, las cuales alcanzan incluso un nivel inferior, generando acumulaciones de agua y evidenciando escurrimientos y goteos en la superficie.
- En la plazoleta de acceso norte, ubicada en el primer piso, se observó una zona de encharcamiento constante. Según el personal de mantenimiento, esta área se inunda recurrentemente cuando las precipitaciones son intensas.
- En el área de la biblioteca, se detectaron goteras y signos de humedad en distintas secciones del techo, lo que sugiere filtraciones provenientes de los niveles superiores.
- En la terraza del decimotercer piso, al tratarse de una zona abierta, se identificó un problema recurrente de acumulación de agua, afectando la estructura de las escaleras de acceso, las cuales presentan signos de deterioro por humedad debido a la concentración de agua lluvia en la parte superior del edificio.

Las imágenes presentadas a continuación y las que se encuentran en el Anexo 8 evidencian cada uno de estos hallazgos y refuerzan la necesidad de considerar estrategias de manejo hídrico dentro del diseño en las infraestructuras actuales, a fin de contribuir a la mitigación de estos problemas estructurales.

Ilustración 12. Fotografías infiltración y humedad edificio Angélico.



Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, dentro del análisis específico del área evaluada, se identificaron también problemas de infiltración de agua lluvia en las terrazas occidentales. En este caso, se evidenció el ingreso de agua a uno de los salones ubicados debajo de estas terrazas, lo que sugiere una posible afectación en la impermeabilización de la estructura. Durante la inspección, se observó al equipo de mantenimiento de la universidad realizando labores de mitigación para controlar esta problemática, lo que refuerza la necesidad de implementar soluciones estructurales efectivas a largo plazo.

Ilustración 13. Fotografías infiltración y humedad terrazas, edificio Angélico.



Fuente: Elaboración propia

A partir de esta observación, se puede justificar que la instalación de muros verdes en estas terrazas podría contribuir a la mitigación de estos problemas al actuar como una barrera adicional contra la infiltración de agua y mejorar la gestión del drenaje pluvial. Además, este tipo de infraestructura verde podría generar un ahorro económico a largo plazo al reducir la frecuencia y el costo de mantenimiento de las zonas afectadas.

No obstante, el análisis detallado sobre los beneficios estructurales, ambientales y económicos derivados de la implementación de muros verdes será desarrollado en apartados posteriores. Por el momento, estos hallazgos sirven como base para comprender las condiciones estructurales del área evaluada y establecer las consideraciones clave que deben tomarse en cuenta en la evaluación técnica de la viabilidad del proyecto.

4.2.3. Análisis de condiciones climáticas y ambientales de la zona

Para determinar la viabilidad técnica del proyecto, es fundamental analizar las condiciones ambientales y climáticas del área de estudio. Por ello, se llevó a cabo un análisis detallado de estos factores, tomando como referencia los indicadores establecidos en la reglamentación de eco urbanismo y construcción sostenible (Alcaldía Mayor de Bogotá & Secretaría Distrital de Planeación, 2022).

La revisión de estos factores climáticos constituye un componente esencial del proyecto, como lo señala la última guía práctica de infraestructura vegetada, que enfatiza la importancia de analizar las características climáticas particulares de la zona de implementación. Elementos como la posición de la infraestructura en relación con el sol, las precipitaciones y otros factores ambientales dependen directamente de la ubicación geográfica, la orientación y la altura de la edificación (Secretaría Distrital de Ambiente, 2023).

En este análisis, se consideraron factores clave como la precipitación, la humedad relativa, los vientos predominantes, la radiación solar, entre otras. Estos elementos no solo guían la

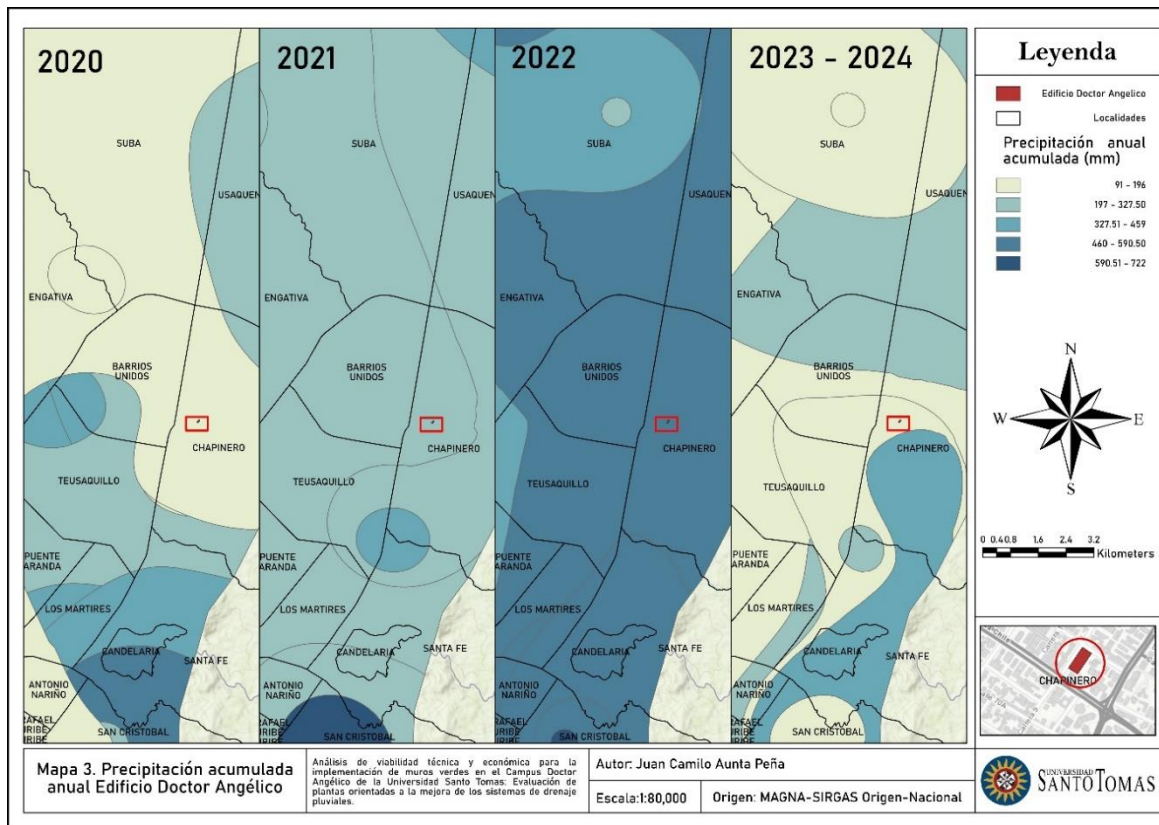
selección de especies vegetales compatibles, sino que también contribuyen al objetivo principal del proyecto.

- **Precipitación:** Al igual que en la mayoría de la región Andina, la ciudad de Bogotá presenta una distribución de lluvias de tipo bimodal¹, caracterizada por dos temporadas lluviosas principales a lo largo del año. Sin embargo, la Sabana de Bogotá muestra ciertas particularidades en cuanto a la intensidad y la época de concurrencia de las temporadas secas y lluviosas, debido principalmente a su ubicación geográfica y altitud. En promedio, Bogotá registra un régimen de precipitaciones promedio de 797 mm anuales lo cual la cataloga como una zona de menor cantidad de lluvias, con una proporción de lluvias 8 días/mes (Alcaldía Mayor de Bogotá & Secretaría Distrital de Planeación, 2022). No obstante, es importante destacar que esta cifra puede variar significativamente de un año a otro, influenciada por factores de variabilidad climática como los eventos El Niño y La Niña (ENSO²). Estos fenómenos, que operan en escalas interanuales, alteran de manera notable la frecuencia e intensidad de las lluvias en gran parte del territorio nacional, incluida la Sabana de Bogotá, así como se ha presentado en los últimos años entre el 2020 y el 2024 el cual presentó eventos continuos de niño y niña, con precipitaciones superiores al 20% de los promedios registrados entre el 2020 y 2022 y seguido de esto un fenómeno del niño que presentó una duración casi 7 meses (Pontificia Universidad Javeriana, 2023).

Ilustración 14. Mapa de precipitación acumulada anual, Edificio Doctor Angelico

¹ Bimodal: Régimen de lluvias que se caracteriza por presentar dos temporadas lluviosas al año, la primera de las cuales ocurre entre abril y mayo, y la segunda de octubre a noviembre; mientras tanto, los periodos secos comprenden, uno entre enero y febrero y otro entre julio y agosto (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2017).

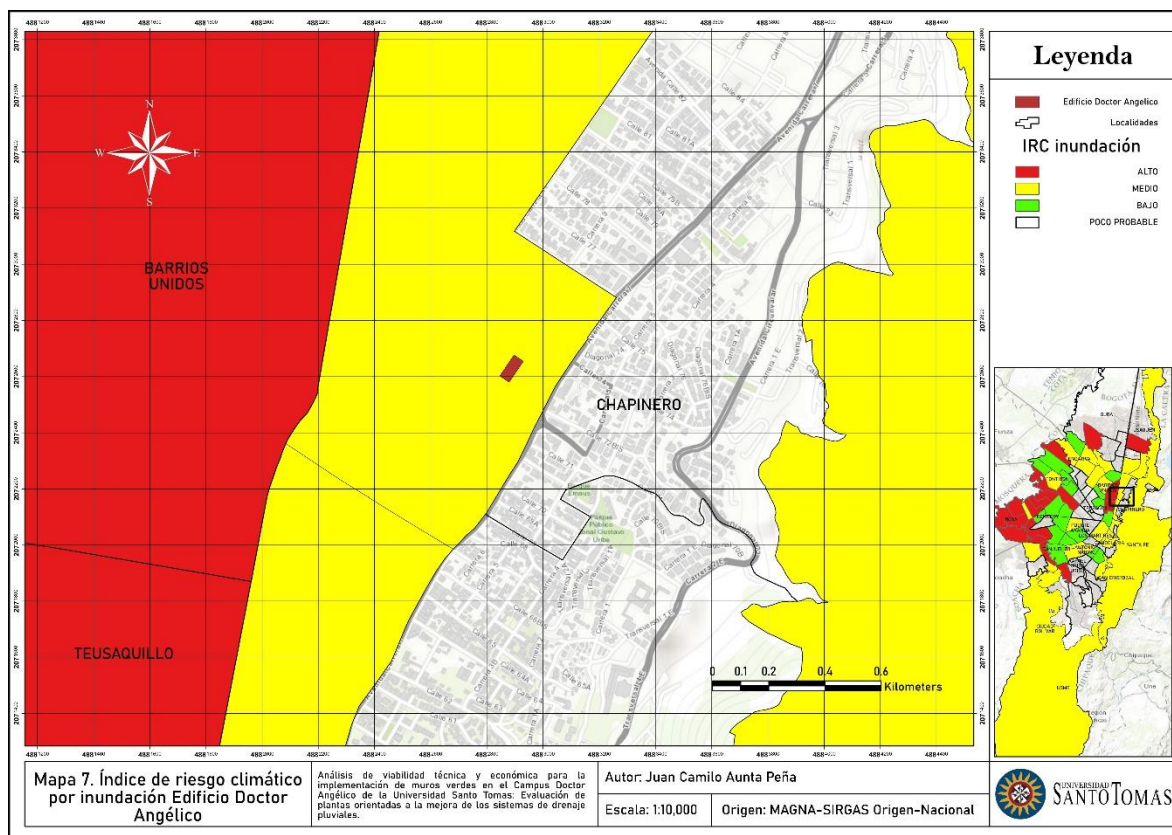
² ENOS: "El Niño-Oscilación del Sur" (ENSO, por sus siglas en inglés), Se trata de fenómenos oceánicos que producen variaciones climáticas a escala planetaria El Niño consiste en un aumento significativo de la temperatura de las aguas superficiales del océano Pacífico a lo largo de las costas de Sudamérica y su alterna una fase de enfriamiento, denominada por analogía La Niña, de recurrencia similar (enel, s.f.).



Fuente: Elaboración propia

Debido a la necesidad de realizar medidas de control frente a este tipo de condiciones de variabilidad climática en Bogotá se han realizado evaluaciones de riesgo a partir de escenarios de cambio climático (ERC), el cual aproxima cuantitativamente indicadores, sociales, económicos, ambientales y otros, los cuales evalúan componentes de riesgo climático en contextos urbanos y rurales. Entre las amenazas evaluadas se encuentra el índice de riesgo climático por inundaciones el cual da de cuenta las actuales condiciones de la ciudad y nos pone en la necesidad de generar estrategias de mitigación y adaptación frente a este tipo de escenarios (Secretaría Distrital de Ambiente, s.f.).

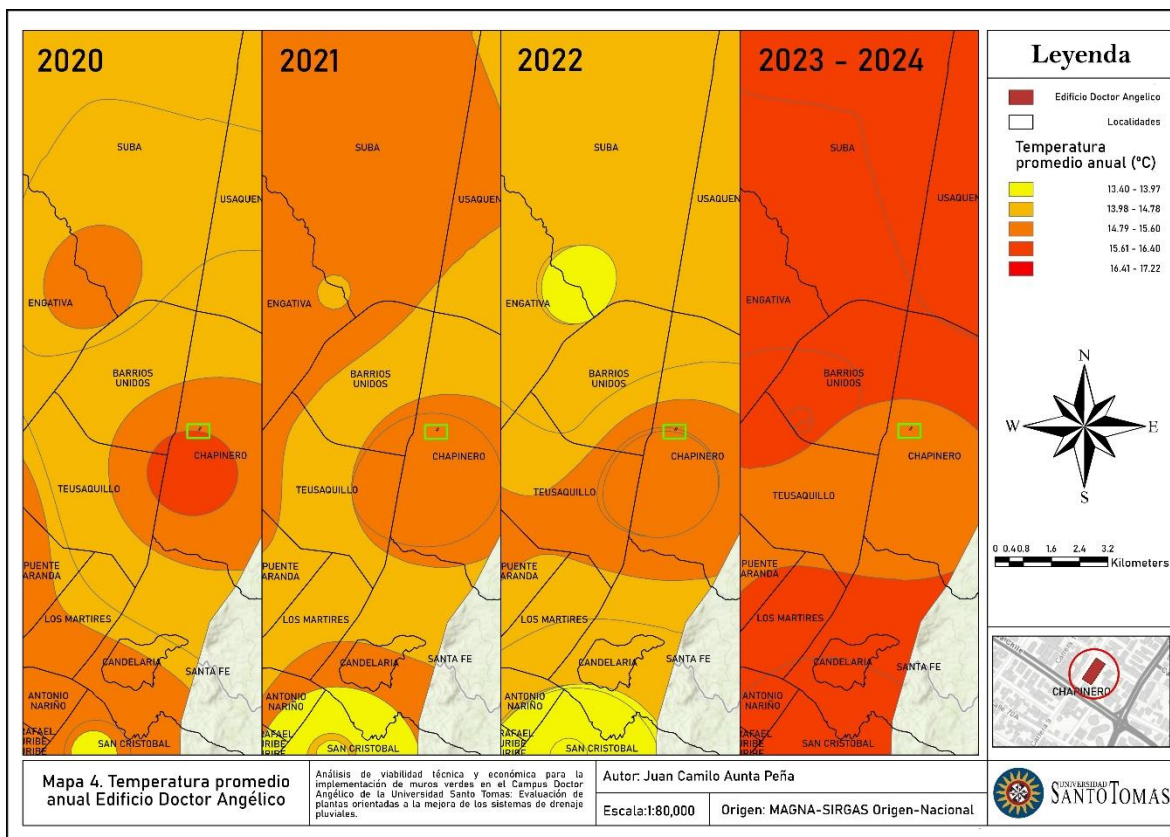
Ilustración 15. Mapa de Índice de riesgo climático por inundación, Edificio Doctor Angelico



Fuente: Elaboración propia

- **Temperatura:** En la región Andina, a diferencia de otras zonas del país, la temperatura está directamente influenciada por la elevación y los pisos térmicos, lo que convierte al componente orográfico en un factor crucial para los valores de temperatura registrados anualmente. Este comportamiento climático evidencia una relación clara: a mayor altitud, las temperaturas tienden a ser más bajas, mientras que las áreas de menor altitud registran valores térmicos más elevados. Según los datos reportados por el IDEAM (2017), existe una correlación directa entre la altitud y las temperaturas promedio observadas a lo largo de las vertientes de esta región. Bogotá se encuentra en la vertiente oriental de la Cordillera Oriental, dentro de una región específica conocida como la Sabana de Bogotá. Este altiplano, situado a una altitud promedio de 2,600 metros sobre el nivel del mar, es una de las áreas más elevadas del país. De acuerdo con los datos del IDEAM, la temperatura promedio es de 13.1 °C y se presentan temperaturas máximas medias entre los 18 y 20 °C en el horario del medio día. (Alcaldía Mayor de Bogotá & Secretaría Distrital de Planeación, 2022). Así como se presenta en el mapa en los últimos años la temperatura promedio en el área del edificio varía entre por encima de los 14°C y por debajo de los 16°C.

Ilustración 16. Mapa de temperatura promedio anual, Edificio Doctor Angelico

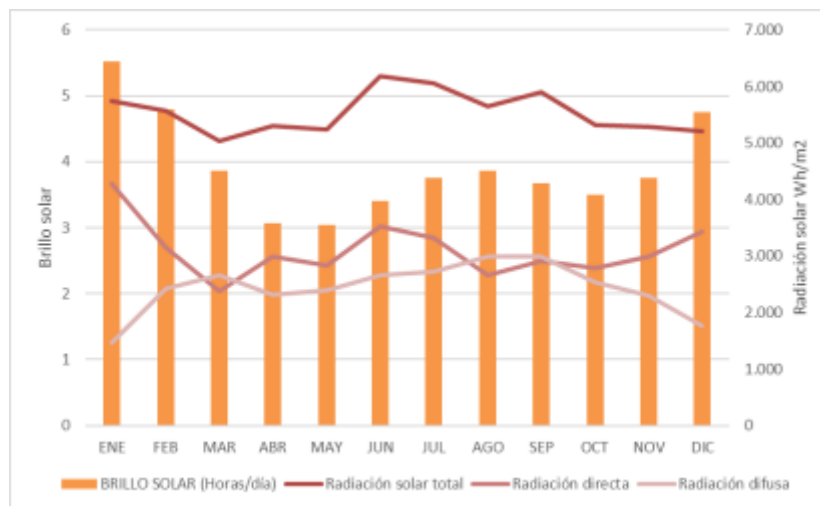


Fuente: Elaboración propia

- Radiación solar: En la medición de la radiación solar, se consideran cuatro indicadores fundamentales que definen el comportamiento de esta energía en el territorio: brillo solar, radiación global. Estos parámetros no solo permiten comprender las características de la radiación solar, sino que también ayudan a identificar cuáles son los factores más relevantes para la evaluación de las condiciones ambientales del proyecto (IDEAM, 2017).

Entre los indicadores de radiación solar, la irradiación global horizontal se destaca como el parámetro clave para evaluar el potencial de la energía solar. Este indicador combina la radiación directa y difusa que llega a la superficie terrestre, siendo esencial para analizar cómo las especies vegetales aprovechan esta energía en su proceso fotoquímico. En el caso de Bogotá, la radiación global tiene un comportamiento bimodal, alcanzando sus valores más altos a comienzos y mediados del año. Durante estos periodos, los valores máximos llegan a estar por encima de los 6,000 Wh/m² y los valores con picos bajos como se representa en la grafica se alcanzaron en marzo con un valor cercano a 5000 Wh/m² (Alcaldía Mayor de Bogotá & Secretaria Distrital de Planeación, 2022).

Ilustración 17. Promedios de radiación y brillo solar para Bogotá



Fuente: (Alcaldía Mayor de Bogotá & Secretaria Distrital de Planeación, 2022)

El brillo solar es un parámetro que mide la cantidad de tiempo durante el cual la superficie del suelo es irradiada por radiación solar directa. Este indicador permite identificar las horas y las zonas con mayor exposición solar, información crucial para analizar en qué momentos del día los muros seleccionados reciben la mayor cantidad de luz solar. En la Sabana de Bogotá, el brillo solar presenta un comportamiento bimodal, con máximos registrados al inicio y a mediados del año. Según los datos disponibles, el mes de enero destaca como el periodo con mayor cantidad de brillo solar, alcanzando un promedio de 6 horas de luz solar directa en meses secos y 4 horas/día en meses lluviosos (Alcaldía Mayor de Bogotá & Secretaria Distrital de Planeación, 2022).

Además, este tipo de radiación solar está influenciada por factores como la nubosidad y la presencia de edificaciones cercanas. Para analizar la trayectoria del sol en la zona de estudio, se utilizó la plataforma SunEarthTools.com, ingresando las coordenadas específicas de las terrazas (4.6567428, -74.0562845).

A partir de esta herramienta, se determinó que la trayectoria solar inicia en el oriente, sobre los cerros cercanos, y finaliza en la parte occidental. Como se observa en la imagen siguiente, durante el día los rayos solares inciden de manera más directa entre las 10:00 a. m. y las 3:00 p. m., periodo en el cual las terrazas reciben una mayor exposición lumínica.

Sin embargo, debido a que las terrazas están orientadas hacia el norte, los muros seleccionados para el proyecto no reciben radiación solar directa, ya que quedan a espaldas de la trayectoria del sol. En este caso, la radiación que alcanzará la vegetación en los muros provendrá principalmente de la luz reflejada en el entorno, generando un ambiente de semisombra. Esto representa una ventaja, ya que permite

proteger las plantas de una exposición excesiva a la radiación solar directa, favoreciendo su adaptación y desarrollo.

Ilustración 18. Trayectoria del sol y rayos solares del edificio doctor angélico.

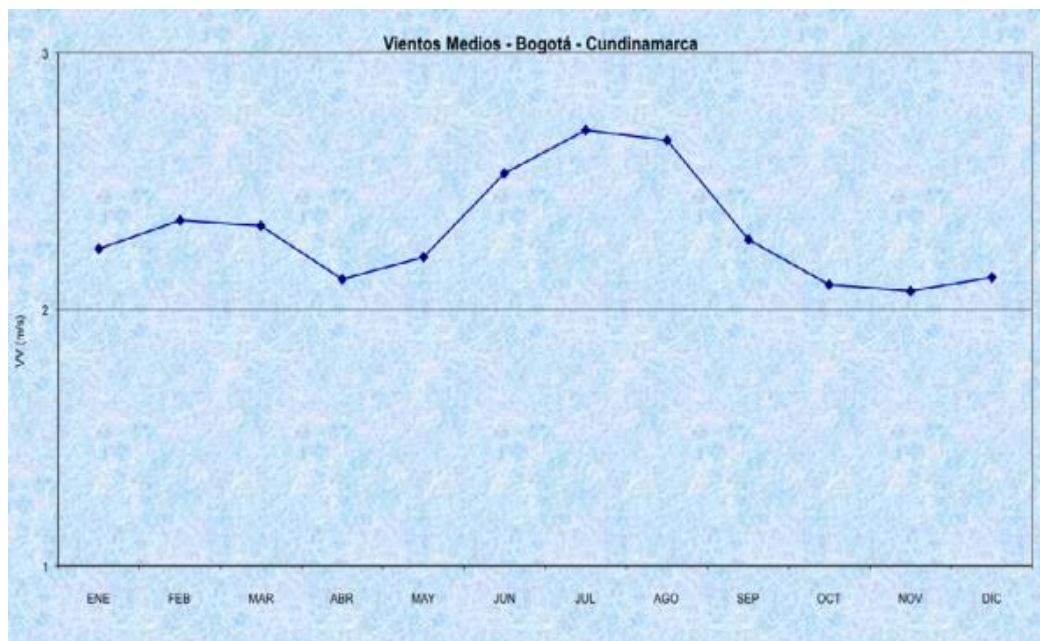


Fuente: (SunEarthTools.com, s.f.)

- **Vientos predominantes:** Este parámetro está determinado por dos variables fundamentales que deben analizarse en conjunto: la velocidad del viento, que mide la distancia que recorre el aire en un tiempo determinado, y la dirección del viento, que corresponde a una magnitud vectorial que indica su punto de origen y destino. Ambas variables son esenciales para comprender el comportamiento del viento en una zona específica y su impacto en las condiciones ambientales del proyecto (IDEAM, 2017).

La velocidad del viento, expresada comúnmente en metros por segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h), juega un papel relevante en el clima de la Sabana de Bogotá. Los vientos en esta región presentan un patrón bimodal, caracterizado por dos períodos principales de mayor intensidad, los valores máximos se registran entre los meses de enero a marzo y junio a agosto, con valores entre los 3 y 5 m/s este último el periodo de mayor predominancia, con velocidades medias mensuales multianuales que alcanzan aproximadamente 2,7 m/s, sin embargo con la urbanización la velocidad llega a oscilar entre 1,5 m/s dependiendo la zona de la ciudad (Alcaldía Mayor de Bogotá & Secretaría Distrital de Planeación, 2022).

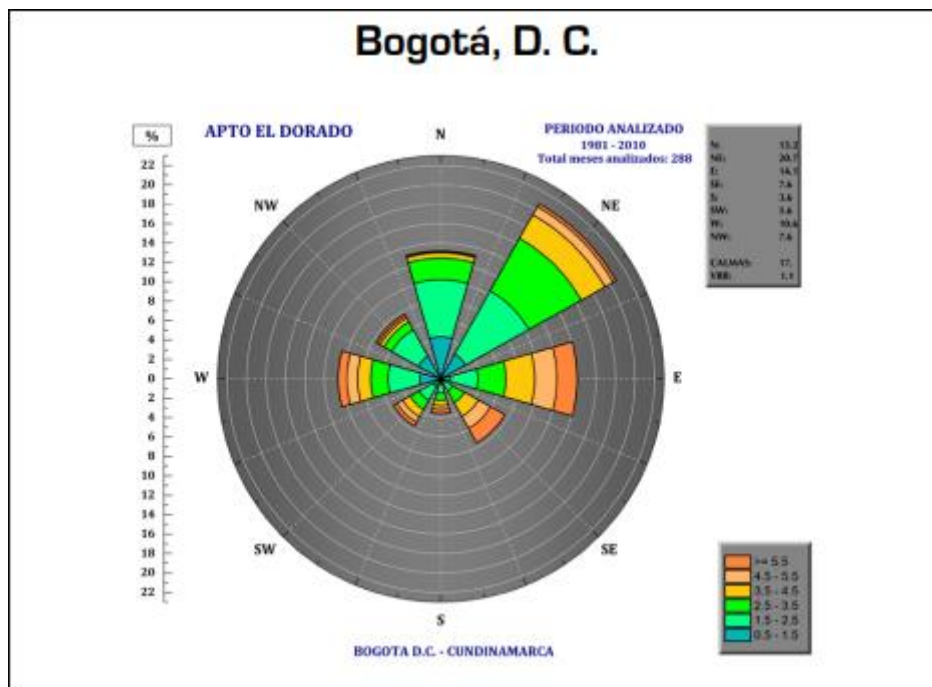
Ilustración 19. Distribución de la velocidad media del viento en Bogotá D.C.



Fuente: (IDEAM, 2017)

En relación con la dirección del viento más representativa para la ciudad de Bogotá, se analizó esta magnitud vectorial a partir de la rosa de vientos generada por el IDEAM (2017), la cual abarca un período de 29 años (1981-2010). El análisis muestra que los vientos predominantes provienen del noreoriente (NE) y el oriente (E), siendo estas las direcciones más recurrentes a lo largo del año. Esta tendencia influye significativamente en la ventilación natural de la ciudad y sugiere que el fenómeno más frecuente en Bogotá es la entrada de aire desde los Cerros Orientales, lo que genera un área de sotavento en la zona occidental de la ciudad. Este patrón de vientos es clave para comprender la dispersión de contaminantes, la regulación térmica y otros factores ambientales relevantes para la planificación de este tipo de proyectos.

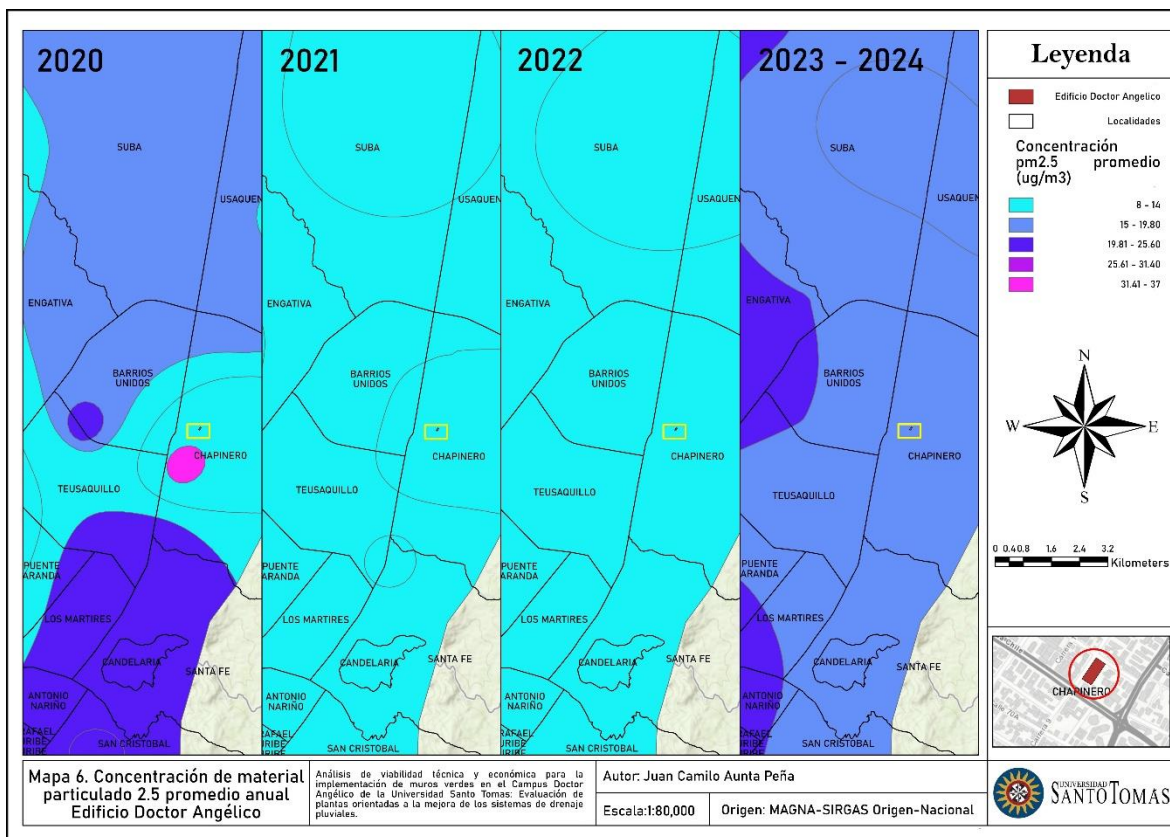
Ilustración 20. Rosa de vientos de Bogotá D.C.



Fuente: (IDEAM, 2017)

Ciertos contaminantes del aire están directamente influenciados por las condiciones atmosféricas, lo que determina su transporte y acumulación en diferentes zonas. En este sentido, es fundamental analizar el comportamiento de las partículas en suspensión, particularmente el material particulado fino (PM_{2.5}), cuyo desplazamiento en el aire depende de factores como la dirección y velocidad del viento. Para evaluar el impacto de este contaminante en el área del edificio Doctor Angélico, se realizó un mapeo histórico de las concentraciones de PM_{2.5} en los últimos años. Este análisis permite comprender las condiciones de exposición de los estudiantes y la comunidad universitaria, considerando que estas partículas pueden contener compuestos nocivos como materia orgánica, carbono orgánico y elemental, así como metales pesados (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2015). Con esta información, se busca justificar las estrategias que contribuyan a mejorar la calidad del aire en el entorno del proyecto. En este caso se puede ver que el Edificio se encuentra anualmente en condiciones por debajo de la normativa ambiental que dictan que 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ anual para el PM_{2.5}. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

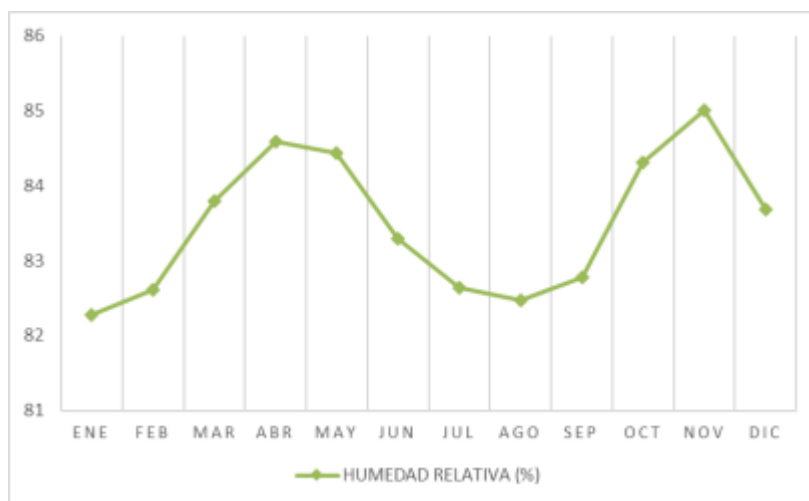
Ilustración 21. Mapa de concentración promedio anual de pM 2.5



Fuente: (IDEAM, 2017)

- **Humedad relativa:** El contenido de humedad en la atmósfera es un factor clave en el comportamiento de las especies biológicas, por lo que su análisis es fundamental para comprender las condiciones ambientales de la Sabana de Bogotá. La humedad relativa, expresada en porcentaje (%), varía entre 1 y 100% y representa la relación entre la masa de vapor de agua contenida en un volumen de aire y la cantidad máxima que este puede retener a una temperatura determinada. En el Altiplano cundiboyacense, los valores de humedad relativa muestran un patrón bimodal, con picos que oscilan entre 83% en los periodos de mayor humedad y 77%. En comparación con otras zonas de la región, donde los valores pueden ser inferiores al 75%, Bogotá se encuentra dentro de un rango óptimo para el desarrollo de una amplia variedad de especies vegetales, lo que resulta favorable para iniciativas de infraestructura verde (Alcaldía Mayor de Bogotá & Secretaría Distrital de Planeación, 2022).

Ilustración 22. Valores de humedad relativa mensual multianual, Bogotá D.C.



Fuente: (Alcaldía Mayor de Bogotá & Secretaría Distrital de Planeación, 2022)

En concordancia con la selección de especies, la clasificación de jardines verticales y la obtención de beneficios, es esencial considerar los factores climáticos históricos y actuales previamente analizados, junto con las características actuales del territorio y las tendencias futuras en la zona.

4.2.4. Identificación de sistemas de muros verdes

Para determinar la infraestructura verde más adecuada para el edificio y justificar su elección con base en sus beneficios técnicos y ambientales, se realizó una revisión de las clasificaciones comunes de jardines verticales. En este análisis, se describió la infraestructura existente y se evaluaron las diferentes categorías de sistemas disponibles, considerando los métodos instalados por los proveedores y su efectividad en el entorno. A partir de estos criterios, se identificó el sistema de muro verde más apropiado para el espacio, alineado con los objetivos de sostenibilidad y mejora de la gestión ambiental del campus.

Como referencia, se tomó la clasificación presentada en el marco conceptual por Cárdenas (2021), la cual categoriza los sistemas según la integración de la vegetación con la infraestructura. Esta clasificación fue seleccionada debido a la necesidad de preservar la fachada en óptimas condiciones y minimizar el riesgo de infiltración de agua, una de las problemáticas identificadas en el edificio Doctor Angélico. Con base en este análisis, se determinará la opción más conveniente y se evaluará a los proveedores en función de su capacidad para cumplir con estos criterios.

4.2.5. Identificación especies vegetales

A partir de los análisis climáticos, este sondeo permitió identificar las especies más adecuadas para garantizar el cumplimiento de los objetivos del proyecto. Para ello, se tomó como referencia el “Catálogo de especies vegetales, techos verdes y jardines verticales, desarrollado por la Secretaría Distrital de Ambiente y el Jardín Botánico de Bogotá (2021). Esta guía promueve la implementación de tecnologías arquitectónicas sustentables y proporciona información clave sobre especies recomendadas, sustratos, nutrientes, mantenimiento y su idoneidad para distintas infraestructuras verdes.

El catálogo utilizado como guía contiene un total de 55 especies vegetales aptas para infraestructuras verdes, adaptadas a las condiciones ambientales de Bogotá. En esta identificación, se aplicaron los siguientes criterios establecidos, que son relevantes tanto para garantizar la viabilidad, instalación y el mantenimiento de los muros verdes con el fin de poder recopilar las especies que más se adapten al proyecto:

- 1) Adecuación a muro verde: Se priorizarán especies vegetales cuyas características (sistema radicular, crecimiento y requerimientos estructurales) sean compatibles con jardines verticales. Se evitarán especies con raíces invasivas o de crecimiento agresivo que puedan comprometer la integridad de la infraestructura. La evaluación se basará en la información proporcionada en el catálogo, donde se especifica si cada especie es adecuada para jardines verticales o cubiertas verdes.
- 2) Uso y beneficios ambientales: Se seleccionarán especies que contribuyan principalmente a la retención hídrica para asegurar el cumplimiento de los objetivos del proyecto. Sin embargo, también se considerarán beneficios adicionales como la reducción de ruido, la captura de material particulado y la absorción de CO₂, con el fin de maximizar los beneficios ambientales y viabilizar el proyecto.
- 3) Adaptabilidad climática: Se analizará la resistencia de las especies a las condiciones predominantes de la Sabana de Bogotá, incluyendo niveles de humedad, temperaturas y radiación solar en los muros seleccionados, entre otros factores.
- 4) Bajo mantenimiento: Se priorizarán especies que requieran poco mantenimiento, como poda, riego y fertilización, asegurando su viabilidad a largo plazo con un manejo eficiente.
- 5) Compatibilidad ecológica y estética: Se fomentará la inclusión de especies que favorezcan la biodiversidad urbana, como plantas que atraigan polinizadores, o que generen un impacto estético positivo en el entorno universitario, valorando la importancia del diseño en estos proyectos de infraestructura verde.

Para llevar a cabo una correcta selección de las especies más adecuadas para la implementación de los muros verdes, se realizó una valoración automatizada mediante la plataforma Excel. Este proceso consistió en identificar las especies óptimas a partir de la detección de palabras clave en la descripción de cada criterio establecido en la tabla de evaluación. A través de una relación automatizada, se asignó a cada especie un valor de "Sí"

o "No" según su cumplimiento con cada criterio, basado en la presencia de términos específicos que el comando lograra reconocer dentro de la descripción de cada especie.

Por ejemplo, en el criterio de adaptabilidad climática, se aplicó una fórmula que identificaba si la temperatura mencionada en la descripción de la especie se encontraba dentro del rango óptimo de 10°C a 18°C. Además, se evaluaban otras características como tolerancia a alta humedad, altitud recomendada (<2600 m.s.n.m.), exposición a la luz solar y resistencia general. Si el sistema encontraba alguna de estas palabras clave en la descripción, se asignaba un "Sí" en la casilla correspondiente; de lo contrario, la especie no cumplía con el criterio y se le asignaba un "No".

Una vez identificadas las especies que cumplían con cada criterio, se realizó un conteo del número de veces que se marcaba "Sí". A partir de este análisis, se estableció que aquellas especies con una puntuación superior a tres (es decir, que cumplían con al menos tres de los criterios evaluados) eran consideradas aptas para su implementación en el proyecto.

4.3. Evaluación de viabilidad económica

4.3.1. Estudio de costos estimados

En este apartado se presentan las cotizaciones recopiladas, con el objetivo de evaluar cuáles cumplen con los requisitos establecidos para el proyecto, cuáles ofrecen mejores incentivos y qué empresa representa la opción más viable para la implementación de los muros verdes. Este análisis permitió comparar costos, calidad de materiales, servicios incluidos y garantías ofrecidas, asegurando que la selección final se alinee con los criterios técnicos, ambientales y económicos definidos previamente, todo lo presentado en este apartado se realizó a partir de las cotizaciones que se presentan en el Anexo 7. Cotizaciones y fichas técnicas.

Se realizó un análisis de cinco empresas especializadas en la instalación de infraestructuras verdes en Colombia, con un enfoque particular en aquellas que operan en la ciudad de Bogotá. Este análisis siguió una metodología similar a la empleada por Cárdenas (2021) en su estudio sobre proyectos de infraestructura verde, identificando el sistema de jardinería vertical que implementan, esto en función de la clasificación previamente mencionada. Asimismo, se incluyó una descripción general de los diseños ofrecidos por cada proveedor y se evaluó su experiencia a partir de los proyectos exitosos que han desarrollado. Finalmente, se analizaron las cotizaciones proporcionadas, considerando aspectos clave como el tipo de jardín vertical, materiales utilizados, dimensiones, densidad de plantación, requerimientos técnicos, durabilidad y resistencia, garantías, facilidad de mantenimiento, sistema de riego, costos de mano de obra, entre otros criterios relevantes para la selección del proveedor más adecuado.

La selección del proveedor se realizó mediante un análisis porcentual, en el que cada criterio brinda una ponderación del 20% dentro del porcentaje de aprobación. Este enfoque permitió evaluar los aspectos clave que debe cumplir el jardín vertical para ajustarse a los requisitos

del proyecto, asignando un peso específico a los atributos ofrecidos por cada empresa, según los criterios establecidos a continuación.

Además, dado que la sostenibilidad del proyecto dependerá de su mantenimiento a largo plazo, se evaluaron los costos y la viabilidad de cada propuesta considerando un esquema de mantenimiento progresivo. Inicialmente, se implementó una fase de mantenimiento mensual durante el primer año, con el fin de garantizar el adecuado establecimiento de la vegetación y el correcto funcionamiento del sistema de riego. Posteriormente, el mantenimiento se realizará de manera trimestral, siguiendo las recomendaciones técnicas para este tipo de infraestructura. Este esquema se proyectó a un período de hasta 50 años, en concordancia con Franco (2015), quien establece que los muros verdes pueden tener una vida útil de entre 40 y 50 años. De esta manera, se buscó optimizar los costos de operación y asegurar la funcionalidad del sistema a lo largo del tiempo.

- **Especificaciones técnicas:** Para cumplir con este criterio, el jardín vertical debe clasificarse como un sistema indirecto continuo, ya sea modular o adherido. Además, debe ser de peso ligero y contar con una densidad de plantación de 25 a 30 plantas por metro cuadrado, asegurando una cobertura vegetal eficiente. Por último, el sistema debe incorporar un mecanismo de recirculación de agua y estar automatizado para optimizar su mantenimiento y eficiencia hídrica. Los muros verdes que cumplan con estas especificaciones técnicas recibirán un 20% de aprobación en este criterio.
- **Costos y viabilidad económica:** Dado que este tipo de proyectos requiere una inversión inicial significativa, se ha tomado como referencia el estudio de posgrado de Franco (2015), "Valoración financiera de fachadas verdes: muros verdes en la ciudad de Bogotá". Este trabajo analiza la viabilidad financiera de los muros verdes a partir de la comparación de distintos estudios de caso en Bogotá. En su análisis, Franco identifica los costos de construcción en cuatro tipos de edificaciones con áreas similares al proyecto del Edificio Doctor Angélico: un conjunto residencial, una oficina, un centro comercial y un hotel. A partir de estos datos, se determinó un valor promedio de inversión inicial para este tipo de infraestructuras, lo que permitió comparar los precios actuales ofrecidos por los distintos proveedores y evaluar la viabilidad económica de cada propuesta.

Tabla 1. Proyectos con muros verdes en operación.

Nombre del pro	Área verde (M2)	Localización	Precio	Valor (COP\$/M2)	O&M (COP/mes)	O&M (COP/m2*mes)	O&M (COP/m2*año)
Conjunto	275	Norte	\$140.646.016,00	\$511.440,06	\$520.000,00	\$1.890,91	\$22.690,91
Oficina	100	Norte	\$70.139.470,00	\$701.394,70	\$300.000,00	\$3.000,00	\$36.000,00
C. Comercial	371	Alamos	\$126.391.160,00	\$340.676,98	\$689.000,00	\$1.857,14	\$22.285,71
Hotel	360	Virrey	\$195.000.000,00	\$541.666,67	\$750.000,00	\$2.083,33	\$25.000,00

Fuente: (Franco Mateus Sergio Andrés, 2015)

Dado que las áreas más comparables con el proyecto corresponden al conjunto residencial y la oficina, se realizó una interpolación entre sus dimensiones y costos iniciales para estimar el precio de una infraestructura con un área de 176,4 m². Sin embargo, debido a que estos valores corresponden al año 2015, es necesario ajustarlos para reflejar las condiciones actuales del mercado. Para ello, se analizó la variación del Índice de Precios al Consumidor (IPC) anual, con el fin de actualizar los costos y obtener una estimación precisa del valor real de este tipo de estructuras verticales en la actualidad.

Tabla 2. Variación de precios de muros verdes.

Actualización de precio muros verdes		
Nombre	Area (m2)	Precio Total
Conjunto (2015)	275	\$ 140.646.016,00
Oficina (2015)	100	\$ 70.139.470,00
USTA MUROS VERDES (2015)	176,4	\$ 100.920.613,51
Precios de 2015 hasta 2025		
Año	IPC	Incremento del precio total
2015	6,77%	\$ 100.920.613,51
2016	5,75%	\$ 107.752.939,05
2017	4,09%	\$ 113.948.733,04
2018	3,18%	\$ 118.609.236,22
2019	3,80%	\$ 122.381.009,93
2020	1,61%	\$ 127.031.488,31
2021	5,62%	\$ 129.076.695,27
2022	13,12%	\$ 136.330.805,55
2023	9,28%	\$ 154.217.407,24
2024	5,20%	\$ 168.528.782,63
2025		\$ 177.292.279,32

Fuente: Elaboración propia

Con esta referencia, se analizó las cotizaciones y se logró valorar porcentualmente en función del valor estimado para 2025, que equivale a \$177.292.279 COP. Para ello, se comparó el valor total de cada cotización, ajustando aquellas realizadas en 2024 mediante el incremento del IPC correspondiente. Cualquier cotización inferior a este valor se consideró económicamente viable y, debido a eso recibiría un incremento del 20% en su porcentaje de aprobación dentro del análisis comparativo.

- **Experiencia y proyectos previos:** Este criterio evaluó la experiencia de la empresa con referente a la instalación de jardines verticales. Se consideró un nivel de experiencia alto si la empresa ha desarrollado proyectos de gran escala, relevantes y

exitosos. En ese caso, el proveedor obtiene un incremento del 20% en su porcentaje de aprobación dentro del análisis comparativo.

- **Mantenimiento y operatividad:** Para garantizar la viabilidad de un proyecto de muros verdes, es fundamental que su mantenimiento y operación a lo largo de su vida útil se lleven a cabo de manera eficiente. Así lo destaca Franco en su estudio, donde resalta la importancia de un mantenimiento adecuado para preservar la funcionalidad y durabilidad de estas infraestructuras. A partir de esto, se considera que un sistema de jardinería vertical será más sostenible si presenta bajos requerimientos de mantenimiento, cuenta con un sistema de recirculación automatizado, utiliza materiales modulares y adaptables que faciliten su reemplazo en caso de daño, posee una alta capacidad de retención de humedad y emplea poco sustrato o un sistema sin sustrato. Estas características no solo prolongan la vida útil del jardín vertical, sino que también optimizan su eficiencia y reducen costos operativos a largo plazo. Para evaluar este aspecto, se realizó un análisis comparativo de los costos de mantenimiento propuestos por cada proveedor.

Este análisis se basará en la tabla 3, que presenta los valores mensuales de operación y mantenimiento de este tipo de infraestructuras. Adicionalmente, los costos se actualizaron utilizando el Índice de Precios al Consumidor (IPC), aplicando la misma metodología utilizada en la actualización de los costos y viabilidad económica.

Tabla 3. Variación de precios de Operación y Mantenimiento muros verdes.

Actualización de precio muros verdes			
Nombre	Area (m2)	Precio Total	Precio O&M (COP/mes)
Conjunto (2015)	275	\$ 140.646.016,00	\$ 520.000,00
Oficina (2015)	100	\$ 70.139.470,00	\$ 300.000,00
USTA MUROS VERDES (2015)	176,4	\$ 100.920.613,51	\$ 396.045,71
Precios de 2015 hasta 2025			
Año	IPC	Incremento del precio total	Incremento del precio O&M
2015	6,77%	\$ 100.920.613,51	\$ 396.045,71
2016	5,75%	\$ 107.752.939,05	\$ 422.858,01
2017	4,09%	\$ 113.948.733,04	\$ 447.172,34
2018	3,18%	\$ 118.609.236,22	\$ 465.461,69
2019	3,80%	\$ 122.381.009,93	\$ 480.263,38
2020	1,61%	\$ 127.031.488,31	\$ 498.513,38
2021	5,62%	\$ 129.076.695,27	\$ 506.539,45
2022	13,12%	\$ 136.330.805,55	\$ 535.006,97
2023	9,28%	\$ 154.217.407,24	\$ 605.199,88
2024	5,20%	\$ 168.528.782,63	\$ 661.362,43
2025		\$ 177.292.279,32	\$ 695.753,28

Fuente: Elaboración propia

Con esta referencia, se pudo analizar las cotizaciones y valorarlas porcentualmente en función del valor estimado para 2025, que equivale a \$695.753 COP. A partir de este cálculo, cualquier cotización inferior a esta cifra se consideró económicamente viable y recibió un incremento del 20% en su porcentaje de aprobación dentro del análisis comparativo.

- **Garantías y valor agregado:** En este ítem, se valoró que el sistema del proveedor incluya garantías que aumenten su viabilidad, como control y supervisión de la obra, manual de mantenimiento, diseño del jardín sin costo, mantenimiento gratuito tras la implementación del proyecto y garantías para equipos o implementos utilizados, la empresa que presente estos valores agregados y garantías recibió un 20% en su porcentaje de aprobación dentro de este criterio.

OFERENTES

Se solicitaron propuestas a cinco proveedores de la ciudad de Bogotá, quienes presentaron diferentes opciones de jardines verticales con sus respectivas condiciones y características. A partir de esta información, se elaboró una tabla que recopila los aspectos más relevantes

extraídos de las cotizaciones y brochures técnicos proporcionados por las empresas. Posteriormente, estos datos fueron organizados y evaluados según los criterios previamente establecidos, con el objetivo de identificar al proveedor más adecuado.

Tabla 4. Elección de proveedores para instalación y mantenimiento de muros verdes

Criterios de evaluación para la elección de proveedor adecuado para la instalación y mantenimiento de muros verdes						
Empresa	Descripción	Cotización				
		Especificaciones técnicas	Costos y viabilidad económica	Experiencia y proyectos previos	Mantenimiento y operatividad	Garantías y valor agregado
		%	%	%	%	%
SUSTENTAR	Empresa dedicada únicamente al desarrollo de infraestructuras verdes como, muros verdes, techos verdes, proyectos de paisajismo, huertas urbanas.	Sistema indirecto continuo adherido, semihidroponico, 4 capas constructivas, 2 capas biológicas, 16 - 25 plantas/m2, peso ligero, sistema de recirculación de riego automatizado.	\$ 164.769.441,09	Alta, con varios proyectos implementados actualmente y varios clientes de entidades publicas y privadas.	\$ 1.378.716,00	Alta, Mantenimiento 2 primeros meses gratuitos, diseño gratuito, un año de garantía de controlador, supervision tecnica, manual de mantenimiento, más...
		%	%	%	%	%
GRONCOL	Empresa dedicada al desarrollo de proyectos paisajísticos, como muros verdes, techos verdes y SUDS.	Sistema indirecto continuo adherido, semihidroponico, con una densidad de plantacion de 25 - 30 plantas/m2, peso ligero, sistema de recirculación de riego automatizado.	\$ 134.404.630,91	Alta, 15 de experiencia en el sector con varios proyectos importantes implementados actualmente y varios clientes de entidades publicas y privadas.	\$ 1.700.000,00	Alta, Sin sobrecostos contractuales, diseño gratuito, supervision tecnica, garantia de equipos de un año y estabilidad de vegetacion de 3 meses, manual de mantenimiento, más...
		%	%	%	%	%
BIOJARDINES	Empresa especializada en paisajismo, incluyendo la instalación de redes de riego y cubiertas ajardinadas. Además, presta servicios de mantenimiento de espacios, podas, talas y provisión y mantenimiento de césped.	Sistema indirecto continuo modular, con paneles de geotextil con capacidad de 25 plantas/m2, peso medianamente ligero, sistema de riego automatizado.	\$ 132.946.800,00	Baja, no se encontro referencias de proyectos con entidades importantes o proyectos importantes implementados.	\$ 1.000.000,00	Baja, garantia de 1 mes por cobertura vegetal y seguimiento por 1 mes de sistema de riego.
		%	%	%	%	%
NATURALBOX	Empresa especializada en la adecuacion de espacios con fines esteticos, con el desarrollo de infraestructuras como jardines verticales naturales y artificiales, plantas y arbustos artificiales, cesped sintetico y venta de materas.	Sistema indirecto continuo modular, con paneles de siembra textil con capacidad de 25 bolsillos de plantacion por metro cuadrado, peso medianamente ligero, sistema de recirculacion de riego automatizado.	\$ 92.751.297,92	Mediana, proyectos mas enfocados en un valor estetico teniendo proyectos considerables con jardines artificiales y pocos frente a jardines naturales.	\$ 2.640.000,00	Baja, garantia de 6 meses por sistema de riego y 1 mes de capa vegetal, 1 mes de mantenimiento gratuito.
		%	%	%	%	%
VERTIN	Empresa enfocada en la implementación de infraestructura vegetada y Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), como muros y techos verdes, proyectos de paisajismo y materas. Además, servicios de mantenimiento, consultoria y diseño.	Sistema indirecto continuo modular, con paneles de siembra textil con capacidad de 5 plantas por bolsillo y 35 plantas por m2, medianamente ligero, con sistema de riego automatizado.	\$ 102.820.249,00	Alta, con varios proyectos implementados actualmente y varios clientes de entidades publicas y privadas.	\$ 2.000.000,00	Mediana, garantia de 1 año para sistema de riego y kanguros de plantación.

Fuente: Elaboración propia

A partir del estudio de costos realizado, se identificaron las características de cada empresa y su capacidad para desarrollar proyectos de infraestructura verde con sostenibilidad a largo plazo. Se evaluó cuál de ellas representa la opción más viable, tanto en términos de instalación como de mantenimiento, garantizando una vida útil estimada de 50 años.

Para ello, se consideró un esquema de mantenimiento progresivo, que incluye intervenciones mensuales durante el primer año de instalación y mantenimientos trimestrales en los años

siguientes. Este análisis permitió proyectar el comportamiento de cada empresa frente a la inflación y el incremento de costos a lo largo del tiempo, utilizando un IPC promedio basado en registros históricos. De esta manera, se estimaron los costos futuros asociados a la infraestructura y su mantenimiento.

Para estimar los costos asociados al consumo de agua en los muros verdes, se realizó un cálculo basado en los tiempos de riego promedio establecidos por cada empresa y el caudal de los sistemas de irrigación utilizados. La mayoría de estos muros emplean goteros autocompensantes, los cuales mantienen un flujo constante de agua, lo que facilita la estimación del consumo.

Según la empresa “Comercial de Riegos”, que provee insumos para riego, estos goteros autocompensantes tienen un rango de caudal que varía entre 2 y 8 litros por hora (lph). Para simplificar el cálculo, se tomó el valor promedio de 5 lph como referencia. Con base en este caudal y los tiempos de riego establecidos para cada empresa, se determinó el consumo total de agua. Posteriormente, este valor se convirtió a costos utilizando las tarifas que la Universidad Santo Tomás, categorizada como No Residencial, Oficial, paga por metro cúbico de agua, según las tarifas vigentes de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (2024) y entendiendo que la facturación se realiza de forma bimensual.

Tabla 5. Tarifas Acueducto y Alcantarillado 2024

NO RESIDENCIAL	CARGO FIJO \$/Suscriptor/mes	dic-2024	NO RESIDENCIAL	CARGO FIJO \$/Suscriptor/mes	dic-2024
	OFICIAL	9.195,79		OFICIAL	4.370,95
	CONSUMO \$/m3	dic-2024		CONSUMO \$/m3	dic-2024
	OFICIAL	3.519,02		OFICIAL	3.761,31

Fuente: (Acueducto Alcantarillado de Bogota D.C., 2024)

Por otro lado, se consideró que muchas de estas empresas implementan sistemas de recirculación de agua para optimizar el consumo hídrico en los muros verdes. Sin embargo, debido a la falta de datos específicos sobre la frecuencia con la que se realiza el reemplazo del agua en estos sistemas y sin considerar la cantidad de agua perdida por evapotranspiración, se asignó un porcentaje estimado de renovación basado en referencias externas.

Para ello, se tomó como referencia el Manual de Hidroponía de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de México (Aquino, 2014), el cual establece que en cultivos hidropónicos el cambio de agua ocurre cada tres o cuatro semanas. Sin embargo, en los muros verdes el flujo de agua es constante y no se almacena en el medio de las plantas, lo que modifica la dinámica de consumo. Por esta razón, se consideró que el consumo total de agua mensual se distribuye en dos semanas, mientras que en las dos semanas restantes el sistema aprovecha

la recirculación del agua, reduciendo así el consumo neto. Este ajuste permitirá estimar con mayor precisión el gasto real de agua en estos sistemas.

Finalmente, con esta información se proyectó el costo total del consumo de agua a lo largo de la vida útil del sistema, permitiendo así determinar los costos de inversión y operación asociados a la implementación de los muros verdes.

4.3.2. Valoración de beneficios socio ambiental y económico

La valoración de beneficios se llevó a cabo basado en la metodología de transferencia de beneficios, descrita previamente en el marco conceptual. Para su desarrollo, se tuvo en consideración el procedimiento establecido en el documento de Criterios Técnicos para la Valoración Económica de la ANLA (2017), aplicando estudios específicos relacionados con muros verdes y considerando aquellos cuyos beneficios se encuentren valorizados de forma correcta, se consideraron gran parte de los beneficios que se recopilaban en el marco teórico que se encontraron acerca de muros verdes y a partir de estos se recopilaban los valores fácilmente valorizables para ser transferidos por medio de la evaluación que hace parte de la metodología.

En este proceso, los valores seleccionados de los estudios de referencia fueron homologados mediante la paridad de poder adquisitivo (PPA)³, ajustando los montos con base en el ingreso per cápita y otros indicadores económicos del país de origen del estudio y el país de implementación del proyecto. Este ajuste se fundamenta en la premisa de que cada índice de precios al consumidor (IPC) nacional valora su divisa en función del costo de vida y la estructura de gasto de consumo en su respectivo país. Debido a que las pautas de consumo varían entre naciones, una comparación directa sin ajustes en el poder adquisitivo carecería de equivalencia y no reflejaría con precisión el valor real de los beneficios a transferir (ANLA; MINAMBIENTE, 2017).

Metodología de valoración

a) Identificación y evaluación de estudios:

Con el fin de identificar la mayor cantidad posible de beneficios susceptibles de valoración mediante la transferencia de beneficios, se realizó una selección y análisis de estudios relevantes obtenidos en la revisión bibliográfica. Posteriormente, se llevó a cabo una evaluación detallada de las características de los proyectos analizados en los estudios seleccionados, comparándolos con las condiciones actuales del edificio Doctor Angélico. Para ello, se consideraron los criterios establecidos por la ANLA (2017), tales como:

³ Paridad de Poder Adquisitivo: Teoría económica que compara el poder adquisitivo entre diferentes monedas, realizando un ajuste de los bienes y servicios entre países, tiene como objetivo igualar el costo de una canasta de productos entre dos países (Cattlin, s.f.).

- Fecha de realización del estudio.
- Título, autor y lugar de la publicación.
- Localización del estudio (país o región).
- Ingresos per cápita del país de origen del estudio.
- Características de la población de estudio.
- Bien o servicio ecosistémico evaluado.
- Tamaño y diseño de la muestra utilizada en el estudio.
- Metodología de valoración empleada.
- Fuentes de información utilizadas (origen de datos, periodo analizado, cantidad de observaciones).
- Funciones econométricas estimadas.
- Tasa de descuento aplicada.
- Criterios de agregación de beneficios, población afectada y criterios de equidad utilizados.

Seguido de esto, se llevó a cabo una evaluación que permitió seleccionar los estudios más pertinentes, garantizando que los valores transferidos sean coherentes con las características y condiciones del proyecto de muros verdes en el Campus Doctor Angélico de la Universidad Santo Tomás. Asimismo, se verificó que las medidas valorativas empleadas en dichos estudios hayan sido estimadas correctamente, asegurando la fiabilidad de los resultados obtenidos.

b) Selección y transferencia de los valores

Una vez identificados los estudios relevantes y aquellos que sean consistentes con las características del proyecto, se extrajeron los valores asignados a los beneficios socio ambientales y económicos tratados en estas investigaciones. Posteriormente, se recopilaron y se realizaron las homologaciones necesarias para su correcta aplicación en el contexto del proyecto.

Para la transferencia de estos valores, se deberá garantizar que las unidades de medición sean equivalentes, permitiendo que los beneficios del proyecto de muros verdes se expresen en los mismos términos y con una relación proporcional respecto a los valores del estudio de referencia. En caso de que el valor lo requiera, se realizó un ajuste de moneda, considerando diversas variables económicas como: Producto Interno Bruto (PIB), Tasa de cambio, Paridad del Poder Adquisitivo (PPA), Índice de Precios al Consumidor (IPC), entre otros. La selección de una o más variables de ajuste depende del grado de diferencia entre los países o regiones donde se realizaron los estudios base y la zona de implementación del proyecto. A partir de estos ajustes, se obtuvieron valores más precisos que permitieron realizar un análisis beneficio-costos adecuado, asegurando que los beneficios estimados sean representativos de la realidad económica y ambiental en Bogotá, Colombia.

A través de esta metodología, se recopilieron 11 documentos que contienen 26 valores cuantitativos relacionados con los servicios ecosistémicos, incluyendo aspectos culturales, de regulación, de sostenimiento, así como beneficios económicos.

Entre los estudios identificados, destaca el más reciente realizado por J.A. Papineau Salm, Marija Bočkarjova, W.J.W. Botzen y H.A.C. Runhaar (2023), en el cual se evaluaron las preferencias de la población respecto a los muros verdes en seis ciudades de los Países Bajos: Ámsterdam, Róterdam, La Haya, Utrecht, Eindhoven y Groningen. Este estudio utilizó la metodología de Experimento de Elección (EC) para valorar los beneficios percibidos de la naturaleza urbana. La investigación se llevó a cabo mediante encuestas dirigidas a la población adulta holandesa, las cuales se realizaron entre septiembre de 2020 y 2021, alcanzando una muestra de 988 encuestados.

Para el análisis de los datos, se aplicó un Modelo Logit Mixto⁴, con el cual se estimaron los beneficios asociados a las preferencias de los ciudadanos. Entre los aspectos valorados se identificaron: Mejora estética del entorno urbano, reducción de la contaminación del aire (PM2.5), regulación térmica y reducción de la temperatura urbana y control de inundaciones y manejo de aguas pluviales. De este se pudo dar de cuenta que las condiciones de la población encuestada fueron bastante amplias por lo que abordaron personas de varios ingresos, varios niveles de educación entre otras características que son útiles para poder traslucir los beneficios de este a el proyecto propuesto.

Otro estudio relevante fue realizado en la Universidad de Lisboa, Portugal, donde se desarrolló y aplicó el modelo MAGICA para apoyar los análisis de costo-beneficio y criterios múltiples en infraestructuras verdes. Esta investigación, llevada a cabo por Inês Teotónio, Carlos Oliveira Cruz, Cristina Matos Silva y Rodrigo Ferreira Reis Lopes (2023), se centró en la evaluación del desempeño de una cubierta verde de 207,66 m², analizando 16 sistemas diferentes con variaciones en su composición estructural. Para medir la efectividad en la retención de agua, se instalaron ocho bancos de pruebas en la cubierta y se monitoreó su desempeño a lo largo de un año. La valoración de los beneficios ambientales se realizó mediante la metodología de costos actuales y potenciales, utilizando el enfoque de valoración de costos de daño evitado para cuantificar el impacto positivo de estos sistemas en la regulación del drenaje pluvial y la mitigación de inundaciones.

Si bien este estudio se centró en una infraestructura horizontal (techos verdes), presenta información relevante que se logró extrapolar a los muros verdes, especialmente en términos de retención de escorrentía. El estudio determinó que las cubiertas verdes analizadas lograron una retención promedio del 82,14% del agua lluvia. Al comparar este valor con estudios previos sobre muros verdes, que indican un rango de retención del 52% al 87% dependiendo de la intensidad y duración de las lluvias (Lau & Mah, 2018), se evidencia una similitud en

⁴ Modelo Logit Mixto: Modelo estadístico que permite una variación aleatoria de preferencias, patrones de sustitución no restringidos y correlación entre factores no observados a lo largo del tiempo. A diferencia de probit, no está limitado a distribuciones normales. Su formulación es sencilla y la simulación de sus probabilidades de elección es computacionalmente simple (Ochoa, 2014).

la eficiencia de captación de agua. Por lo tanto, el valor económico por metro cuadrado estimado para cubiertas verdes en el estudio de Lisboa se utilizó como referencia para la valoración de los muros verdes, ajustando las condiciones climáticas y estructurales específicas del proyecto en Bogotá.

Un estudio realizado por los mismos autores del artículo previamente mencionado, Inês Teotónio, Carlos Oliveira Cruz, Cristina Matos Silva y Maria Manso (2021), se enfocó en la recopilación de costos y beneficios asociados a muros y techos verdes. En esta investigación, los autores realizaron un análisis bibliográfico exhaustivo, identificando diversos beneficios cuantificados en la literatura existente hasta la fecha. Uno de los hallazgos más relevantes fue que los muros verdes pueden generar un ahorro energético de hasta un 66% en el uso de aire acondicionado. Sin embargo, en el caso del Edificio Doctor Angélico, este beneficio específico no es directamente aplicable, ya que las aulas contiguas a las terrazas no cuentan con sistemas de climatización artificial. A pesar de ello, la inclusión de este tipo de beneficios en el análisis es fundamental, ya que el proyecto puede ser replicado en otras sedes de la universidad o en sectores donde sí se utilicen sistemas de calefacción o refrigeración, ampliando así su impacto en términos de eficiencia energética y sostenibilidad.

El análisis costo-beneficio de las fachadas verdes en el proyecto de Empresas Públicas de Medellín (EPM) se basa en la valoración de beneficios socio ambientales mediante la transferencia de beneficios. Este estudio cuenta con valores cuantitativos expresados en moneda colombiana, los cuales fueron calculados en el marco de una tesis de maestría, lo que le otorga un alto grado de solidez y confiabilidad para la recopilación de datos. El estudio se realizó con el propósito de evaluar la readaptación de una infraestructura verde que había alcanzado el final de su ciclo de vida útil, integrando datos de diversas fuentes para la transferencia de beneficios. Dentro de los beneficios analizados, se identificaron aspectos económicos y ambientales con valores ya determinados por los autores. Entre los hallazgos más relevantes, se estimó un ahorro energético del 30% en costos de enfriamiento, lo que también generaba reducción de emisiones de carbono. Sin embargo, este beneficio no será incluido en la presente valoración, dado que el Edificio Doctor Angélico no cuenta con un sistema de climatización.

Por otro lado, se identificaron beneficios valorados en términos de atenuación de ruido, aumento de la biodiversidad y mejora en la calidad del aire, específicamente en la reducción de material particulado (PM) y óxidos de azufre (SO₂). Estos beneficios han sido expresados en costos por metro cuadrado y por persona u hogar, lo que facilitó su asignación al presente proyecto, considerando el número de personas afectadas y el área total intervenida.

A pesar de que estos valores provienen de una metodología de transferencia de beneficios, se planteó su incorporación en la valoración final del proyecto, dado su respaldo académico y su aplicabilidad en el contexto urbano de Bogotá (Banoy Velásquez Catherine & Osorio Duarte Daniel David, 2021).

En China, se llevó a cabo un estudio para evaluar las preferencias y percepciones públicas respecto a las infraestructuras verdes, utilizando los métodos de valoración contingente y costos de viaje. La investigación tuvo como objetivo determinar la disposición a pagar (DAP)

de los habitantes de Guangzhou por la instalación de infraestructuras verdes en zonas densamente urbanizadas. El estudio se basó en 409 encuestas presenciales, en las cuales se analizaron diversas variables demográficas, como nivel educativo, ingresos y conocimiento sobre los servicios ecosistémicos. A través de este enfoque, se buscó identificar qué beneficios ambientales son más valorados por la población y cuáles estarían dispuestos a financiar.

Dado que las encuestas permitían seleccionar múltiples servicios ecosistémicos, no fue posible asignar directamente la DAP a un solo beneficio específico. Sin embargo, los resultados revelaron que los dos servicios ecosistémicos más valorados fueron la regulación de la calidad del aire (65%) y la regulación de la temperatura (52%). Dado que el servicio más preferido por la población fue la regulación de la calidad del aire, se decidió asignar el DAP calculado en el estudio a este beneficio en el presente análisis (Zhang, Ni, Wang, Chen, & Xia, 2020). Los costos de viaje valorados para los muros verdes no se tuvieron en consideración debido a que el análisis de costos de viaje se basaba en lo pagado por ir a apreciar la infraestructura, por lo cual no es factible compararlo con el proyecto debido a que no es una obra pública que tienda a ser atracción turística.

En 2020, se llevó a cabo un estudio en la Universidad Çukurova, en Adana, Turquía, con el objetivo de evaluar la eficiencia térmica de los muros verdes mediante modelación en Revit. La investigación analizó un montaje de 3.648 m² de muro verde en un clima cálido-húmedo, caracterizado por veranos calurosos e inviernos cálidos y lluviosos. Para la modelación en Revit, se utilizaron datos de temperatura obtenidos de estudios previos. Los resultados evidenciaron que la implementación de muros verdes permite una reducción en la demanda de aire acondicionado y calefacción de entre 16% y 19%. Si bien este beneficio de ahorro energético no es aplicable a la valoración económica del presente estudio, debido a que el Edificio Doctor Angélico no cuenta con sistemas de climatización artificial, estos resultados pueden ser relevantes para futuras implementaciones en edificaciones con mayor consumo energético (Şimşek & Şenyiğit, 2020).

Rebecca Collins, Marije Schaafsma y Malcolm D. Hudson (2017) realizaron un estudio en Southampton, Inglaterra, en el que evaluaron los beneficios de los muros verdes en la biodiversidad urbana. La investigación utilizó la metodología de experimento de elección (EC) y se centró en dos tipos de muros verdes de diferentes tamaños, ubicados en el centro de la ciudad. Para el estudio, se encuestó a 127 adultos, de los cuales el 44% eran hombres, mediante un muestreo de conveniencia⁵. Los datos obtenidos fueron analizados utilizando un Modelo Logit Mixto, el cual permitió determinar la preferencia de los ciudadanos y su disposición a pagar (DAP) por la generación de políticas para la implementación de muros verdes como método de aumento de la biodiversidad proporcionado por estas infraestructuras verdes. El valor obtenido en este estudio se recopiló para ser transferido al presente proyecto,

⁵ Muestreo de conveniencia: Método de muestreo no probabilístico en el cual la muestra se elige de acuerdo con la conveniencia de investigador, le permite elegir de manera arbitraria cuántos participantes puede haber en el estudio (González, 2020).

ajustándolo a la población afectada, considerando las condiciones locales y los indicadores económicos pertinentes.

Varios estudios han analizado el potencial de retención térmica de los muros verdes, destacando su impacto en la eficiencia energética. En este sentido, el estudio realizado por Ross W.F. Cameron, Jane Taylor y Martin Emmett (2015) en la Universidad de Reading, Inglaterra, determinó que el beneficio energético de los muros verdes oscila entre un 21% y 37%, basado en un monitoreo de temperatura en un muro verde instalado en el campus. El estudio se llevó a cabo en un clima templado, con una temperatura máxima media invernal de 9°C y una precipitación media invernal de 54 mm, condiciones en las que se evidenció que los muros verdes contribuyen a la reducción de costos de calefacción, mejorando la conservación de energía en edificaciones. Si bien esta eficiencia térmica no es directamente aplicable al presente proyecto debido a las diferencias climáticas con Bogotá y a que no se tienen implementados sistemas de calefacción, los valores obtenidos en este estudio podrían ser transferidos y adaptados a futuros proyectos en zonas con condiciones similares.

En 2015, se llevó a cabo una revisión de literatura con el objetivo de identificar los efectos de las infraestructuras verdes en los servicios ecosistémicos. Este estudio recopiló múltiples investigaciones que evaluaban distintos beneficios ambientales asociados a techos y muros verdes, utilizando metodologías de costos actuales y potenciales, así como enfoques basados en costos de daño evitado y costos de reemplazo.

Los resultados de la revisión indicaron que, dentro de los beneficios valorados, se encontraba la reducción del consumo de energía en calefacción y la regulación de la calidad del aire. Si bien la valoración del ahorro energético no es aplicable a este proyecto, la captura y reducción de contaminantes atmosféricos sí puede ser considerada dentro del análisis de beneficios. En este sentido, el estudio proporcionó estimaciones cuantitativas de los costos evitados por la retención de contaminantes en áreas de captura. No obstante, la fiabilidad de estos valores es limitada, ya que los valores asignados por el daño evitado en los que se basa la revisión fueron realizados en 2010. Desde entonces, han ocurrido cambios significativos en las dinámicas atmosféricas, impulsados por la urbanización acelerada, la industrialización y el cambio climático. Por ello, utilizar estos valores de hace más de 25 años podría no ser del todo preciso en el contexto actual (Wang, Bakker, de Groot, & Wörtche, 2014).

Uno de los estudios más aplicados en la valoración de beneficios de infraestructuras verdes es el realizado por Katia Perini y Paolo Rosasco (2013). Este estudio desarrolla un análisis costo-beneficio basado en un modelo computarizado de un edificio de oficinas, evaluando distintos escenarios urbanos. Se plantearon tres escenarios principales:

- Escenario desfavorable: Ubicación en la zona central de la ciudad.
- Escenario intermedio: Ubicación en una zona semicéntrica.
- Escenario favorable: Ubicación en la periferia urbana.

El análisis consideró cuatro tipos de muros verdes, clasificándolos en directos e indirectos. Para el presente estudio, se toma como referencia el Living Wall System, el cual se clasifica como un muro verde indirecto continuo adherido. Este sistema modular fue evaluado en una superficie de 215 m², aplicando la metodología de transferencia de beneficios. Dentro de los beneficios valorados, el Living Wall System presentó, la reducción del consumo energético por enfriamiento y calefacción, beneficios económicos asociados a la longevidad de la infraestructura y costos evitados en el mantenimiento del edificio, incremento del valor de la propiedad tras la implementación de muros verdes, y por otro lado valor de servicios ecosistémicos como reducción de emisiones de carbono y mejora de la calidad del aire. Se asignaron los valores que se lograba tener registro de valoración, basándose en estudios previos sobre el impacto económico de las zonas verdes.

Para la justificación de la cuantificación de la reducción de emisiones de carbono, se han identificado estudios que indican que un techo verde puede llegar a retener entre 72 y 85 kg de contaminantes por metro cuadrado. Sin embargo, este valor no se utilizó en el presente análisis, debido a que es un dato antiguo, por lo que podría no reflejar con precisión las condiciones actuales de captura de carbono y por las diferencias significativas entre techos y muros verdes, principalmente en la vegetación utilizada, lo que implica una variación en la capacidad de retención de CO₂. Por esta razón, se tomó como referencia el valor propuesto por Banoy y Osorio en Medellín (2021), quienes, en su marco teórico, argumentan que la capacidad de retención de CO₂ es de 2,3 kg/m² el cual está basado en la empresa que realizó la construcción el proyecto cubo verde en EPM y que tiene una experiencia de 28 años en el sector con proyectos en varias partes del mundo.

Los beneficios utilizables y transferibles al presente proyecto corresponden principalmente a beneficios socioambientales, como la reducción de carbono, factores cada vez más relevantes debido a la implementación de nuevos impuestos sobre la reducción de carbono. Los beneficios económicos, el incremento en el valor de la propiedad y la longevidad de la infraestructura son indicadores que pueden ser considerados, aunque con ciertas limitaciones. En el estudio de Perini y Rosasco, la valorización del inmueble se determina en función del incremento en el precio de alquiler por metro cuadrado y la reducción de costos de mantenimiento en la fachada.

En el caso específico de la Universidad Santo Tomás, este enfoque presenta dos desafíos y una limitación:

- Valor de la propiedad horizontal: A diferencia de un bien comercial o residencial sujeto a alquiler, el campus universitario no genera ingresos a partir de arrendamientos, por lo que la metodología de valoración debe ajustarse para estimar el aumento en el valor de la propiedad institucional en lugar de basarse en precios de alquiler.
- Cálculo de longevidad y ahorros en mantenimiento: La metodología del estudio original considera el ahorro en mantenimiento de las fachadas en función de su vida

útil. Sin embargo, en la universidad, los costos de mantenimiento son generales y no están discriminados por áreas específicas como las terrazas. Para aplicar correctamente este beneficio, sería necesario revisar las facturas y costos asociados exclusivamente a las terrazas, lo que representa una limitante debido a la disponibilidad de datos y al tiempo necesario para este análisis.

- Ahorro de energía por refrigeración y calefacción: Este beneficio ya se discutió anteriormente y es debido a que no se cuenta con este tipo de sistemas.

Por último el estudio más antiguo del cual se tiene registro de valoración es el realizado para la evaluación de muros y techos verdes como medidas de atenuación de ruido, este se basó en la modelación del entorno europeo y un bloque de apartamentos de seis pisos al costado de calles con valores de ruido asignados por estudios, basándose en el flujo de 20000 vehículos al día. Se realizó el análisis de valorización por costos actuales potenciales y costos de reemplazo en donde se modelo un muro de 58 m² y uno de 369 m² los cuales reducían 4.5 dB(A) y 4.1dB(A) respectivamente. Esto logro generar valores de cuantificación basado en el reemplazo de entornos, de uno con ciertos niveles expuestos y contra los decibeles que se redujeron y a partir de eso cuanto se pagaría según valores de amenidad en viviendas los cuales presentan datos de valoración de dB reducidos por persona. Este se utilizo en el proyecto teniendo en consideración la amenidad que pagaría el personal universitario (Veisten, y otros, 2012).

Teniendo en cuenta los estudios seleccionados, se realizó la elección de los valores a transferir con el fin de aplicar los ajustes monetarios adecuados y adaptarlos a las condiciones del proyecto. Estos ajustes se basaron en dos procesos fundamentales, la actualización de valores mediante el Índice de Precios al Consumidor (IPC) anual, con el objetivo de reflejar la inflación y variaciones en los precios a lo largo del tiempo y la homologación de valoraciones extranjeras a la economía colombiana, utilizando la Paridad de Poder Adquisitivo (PPA) como herramienta de ajuste.

El uso del PPA permite comparar el esfuerzo económico real de los hogares, considerando que el costo de vida varía significativamente entre países. Para ello, se calculo un factor de paridad porcentual basado en la relación entre el PIB per cápita, PPA del país de origen del valor ambiental y el PIB per cápita, PPA de Colombia.

Ecuación 3. Paridad de Poder Adquisitivo (PPA)

$$Valor\ ajustado = Valor\ origen * \left(\frac{PIB\ per\ cápita\ (PPA)\ País\ de\ estudio}{PIB\ per\ cápita\ (PPA)\ País\ de\ origen} \right)^n$$

Fuente: (Navrud & Ready, 2007)

La consideración de elasticidad (n) es un factor de ajuste que corrige diferencias en la capacidad de pago y disposición a pagar entre países. Su valor generalmente oscila entre **0.2** y **1.0**, por lo que se seleccionó un valor intermedio de **0.5** como medida representativa.

Los valores de Paridad de Poder Adquisitivo (PPA) de los países se recopilaron a partir de los datos proporcionados por el Banco Mundial, específicamente el indicador PIB per cápita, PPA. Este indicador expresa el Producto Interno Bruto (PIB) per cápita en dólares internacionales corrientes, utilizando el factor de conversión de PPA.

El PIB per cápita, PPA es una medida que refleja el valor agregado bruto de todos los productores residentes en un país, incluyendo los impuestos sobre los productos y excluyendo los subsidios no incorporados en el valor de los productos. Este enfoque permitió realizar comparaciones económicas más precisas entre países al corregir las diferencias en los niveles de precios (Banco Mundial, s.f.).

Después de calcular el ajuste por Paridad de Poder Adquisitivo (PPA), se utilizó la tasa de cambio oficial publicada por el Banco de la República de Colombia el 19/02/2025 para convertir el valor final a pesos colombianos (COP). En caso de que no se disponga de una tasa de cambio directa entre la moneda de origen y el peso colombiano, se aplicó un proceso intermedio de conversión. Para ello, se utilizó la tasa de cambio del Exchange-rates.org de los Estados Unidos, que proporciona valores actualizados del dólar (USD) con respecto a diversas monedas extranjeras. Primero, se convirtió la moneda de origen a dólares estadounidenses (USD) y, posteriormente, se realizó la conversión de USD a pesos colombianos (COP) utilizando la tasa de cambio oficial del Banco de la República de Colombia.

Este procedimiento garantiza que las conversiones monetarias sean precisas y reflejen las condiciones económicas actuales, asegurando la coherencia en la valoración de beneficios transferidos al contexto colombiano.

En los casos donde el estudio no especifique una ubicación geográfica precisa, se aplicó el PPA del país de la institución académica o entidad a la que esté afiliado el autor principal. Este criterio asegura que los valores transferidos mantengan coherencia con las condiciones económicas y de mercado del país de origen del estudio.

Por ejemplo, en el estudio de Hornikx et al. (2012), que modeló entornos urbanos europeos sin una referencia geográfica específica, se aplicó el PPA de Países Bajos, ya que el autor Martín Hornikx está afiliado a la Universidad Tecnológica de Eindhoven, ubicada en dicho país y bajo su régimen monetario.

En el caso de indicadores ambientales, se priorizo estudios recientes y específicos. Por ejemplo, Katia Perini y Paolo Rosasco (2013) analizaron los beneficios de la captura de carbono en muros verdes; sin embargo, para este proyecto se adoptó el valor actualizado del estudio de Banoy y Osorio en Medellín (2021), el cual establece que los muros verdes capturan 2,30 kg de CO₂ por metro cuadrado. Para obtener la valoración se realizó el cálculo respectivo para identificar cuánta cantidad de CO₂ captura el área del proyecto y según el valor del impuesto al carbono se valorizó basado en que por cada TonCO₂eq se tiene un precio de \$ 25.799 COP (FEDEMADERAS, 2024).

Según los valores ajustados a la moneda local y al año actual, se utilizó estos valores cuantitativos en las condiciones específicas del Edificio Doctor Angélico. Dado que la mayoría de los beneficios han sido valorados mediante la Disponibilidad a Pagar (DAP), será necesario ajustar estos valores al número total de personas que frecuentan el edificio. Esta información fue proporcionada por el área de planeación de la Universidad para los cálculos correspondientes. Por otro lado, los valores asociados al área del proyecto se evaluaron en función del área bruta estimada en apartados anteriores.

En cuanto a la valorización de beneficios, se identificó que la implementación de infraestructuras verdes contribuye al aumento del valor de las propiedades. Sin embargo, este indicador no puede aplicarse al Edificio Doctor Angélico, ya que, por políticas de confidencialidad, no es posible acceder a su valor comercial. Por esta razón, este beneficio no será considerado dentro del análisis final.

4.3.3. Indicadores de viabilidad

A partir de los indicadores Valor Presente Neto (VPN) y Relación Beneficio-Costo (RBC), descritos en el marco referencial, se evaluó la rentabilidad de la implementación de los muros verdes, permitiendo determinar su viabilidad económica. Para ello, se consolidó en una tabla la estructura de costos de la empresa seleccionada como la más sostenible, junto con los beneficios valorizados en el apartado anterior.

Una vez definidos los costos y beneficios del proyecto, se aplicó la tasa de descuento correspondiente, siguiendo los lineamientos del Departamento Nacional de Planeación (DNP) establecidos en la Resolución N° RAD_R (2022). Dicha resolución establece una tasa social de descuento para proyectos de inversión pública, la cual varía según el horizonte temporal del proyecto, especialmente en aquellos con un enfoque ambiental.

La siguiente tabla presenta las tasas aplicables según el periodo de evaluación del proyecto.

Tabla 6. Tasa social de descuento según horizontes del proyecto.

Tasa Social de Descuento (%)	Horizonte de Evaluación del proyecto (años)
9,5 %	0-5
6,4 %	6-25
3,5 %	26- en adelante

Fuente: (Departamento Nacional de Planeación, 2022)

Por lo tanto, la tasa social de descuento establecida en la resolución es del 3,5%, aplicada tanto a los beneficios como a los costos a lo largo del tiempo, considerando que el horizonte del proyecto es de 50 años.

Para la determinación de la tasa de descuento del proyecto, se realizó un promedio entre esta tasa de inversión pública y la utilizada en el proyecto Cubo Verde en Medellín, específicamente la que Empresas Públicas de Medellín (EPM) emplea en negocios de pronto pago con proveedores y contratistas (Banoy Velásquez Catherine & Osorio Duarte Daniel David, 2021).

Siguiente a esto se realizó un análisis de sensibilidad, con el fin de verificar la robustez de los resultados e investigar el impacto de los parámetros en escenarios con mayores incertidumbres para ello se debe calcular el VPN y la RBC variando valores en diferentes escenarios posibles, comparando en cada caso los resultados entre alternativas, con el fin de identificar qué parámetro afecta en mayor medida los criterios de aceptación o rechazo (ANLA; MINAMBIENTE, 2017). Por lo tanto, este análisis calculo el VPN en dos diferentes escenarios a los del resultado del análisis inicial.

El primer escenario que se evaluó consiste en reconocer los valores tangibles de los beneficios estimados. Uno de estos beneficios tangibles es el aporte de los muros verdes a la gestión del drenaje pluvial. Sin embargo, otros beneficios como la mejora paisajística, aunque generan un impacto positivo para la Universidad, no reflejan un valor de ahorro concreto por lo que no se tuvo en cuenta en este escenario, ya que dependen de percepciones subjetivas y no pueden ser fácilmente cuantificables en términos económicos. Este primer escenario busco identificar cuáles son los beneficios clave que justifican la implementación de estas infraestructuras, en función de la rentabilidad que representan para la universidad. A partir de los beneficios que se consideraron estratégicamente relevantes, se procedió a calcular los indicadores financieros Valor Presente Neto (VPN) y Relación Beneficio-Costo (RBC), analizando su comportamiento y su impacto en la viabilidad económica del proyecto.

El segundo escenario considero una reducción del 50% en los beneficios ambientales estimados, asumiendo que estos generan únicamente la mitad del valor inicialmente proyectado. Este análisis permitió evaluar el impacto de una posible sobreestimación en la cuantificación de los beneficios y su efecto en la viabilidad del proyecto. A partir de este ajuste, se analizó el comportamiento financiero mediante los indicadores que se vienen evaluando. Esto facilito la identificación de posibles riesgos y permitió determinar si el proyecto sigue siendo viable aún en condiciones menos favorables en términos de beneficios socio ambiental y económico.

5. RESULTADOS

5.1.1. Viabilidad técnica

Selección de áreas potenciales

Tras la revisión de las áreas potenciales del Campus Doctor Angélico y el análisis cualitativo correspondiente, se identificó que las terrazas occidentales son las más adecuadas para la instalación de muros verdes, así como para evaluar la viabilidad técnica y económica del

proyecto. Estas zonas presentan mínimas limitaciones en relación con los criterios establecidos, lo que las convierte en espacios óptimos para la implementación de infraestructuras sostenibles.

Las condiciones actuales de las terrazas permiten el desarrollo de muros verdes capaces de generar beneficios económicos, ambientales y sociales, contribuyendo a la sostenibilidad del campus. Además, estos beneficios pueden justificar la inversión inicial del proyecto, favoreciendo su viabilidad a largo plazo. El análisis de las áreas potenciales se puede encontrar en el Anexo 1. Evaluación de selección (áreas potenciales).

Tabla 7. Criterios de evaluación para la selección de áreas potenciales

Criterios de evaluación para la selección de áreas adecuadas para la instalación y mantenimiento de muros verdes				
Criterio de Evaluación	Terraza del Piso 13	Muros Exteriores del Edificio	Espacio Oriental (Cercano a Cafetería)	Terrazas Occidentales (Seleccionadas)
Superficie Disponible	Media	Alta	Baja	Alta
Exposición Solar y Pluvial	Alta	Alta	Media	Media
Viabilidad Estructural	Baja	Media	Media	Alta
Accesibilidad para Instalación y Mantenimiento	Alta	Baja	Alta	Alta
Impacto Ambiental y Funcionalidad Interna	Baja	Alta	Baja	Alta
Factibilidad Económica	Alta	Baja	Baja	Media

Fuente: Elaboración propia

El análisis realizado evidenció que la terraza del décimo tercer piso del edificio Doctor Angélico presenta condiciones favorables para la implementación de cubiertas verdes, debido a su amplia superficie y a la acumulación significativa de agua lluvia. Lo que representa una oportunidad de incorporar espacios verdes que podrían aportar beneficios ambientales significativos, como la optimización del drenaje pluvial para aliviar la presión de estos sistemas y poder mitigar problemáticas identificadas en esta zona, junto con beneficios como el aprovechamiento del espacio para mejorar la calidad ambiental del campus.

Asimismo, se identificó que los muros exteriores del edificio representan una alternativa viable para la instalación de muros verdes, dada su amplitud y exposición. La orientación del edificio permite, que en el costado sur - occidental del edificio, reciba incidencia solar directa principalmente, lo que genera un entorno adecuado para ciertas plantas en ciertas horas del día.

No obstante, para la implementación tanto de cubiertas como de muros verdes, es fundamental realizar un análisis estructural exhaustivo, a cargo de un ingeniero civil, quien

deberá evaluar las cargas estructurales y determinar con precisión las condiciones técnicas de viabilidad para la ejecución del proyecto.

Condiciones de infraestructura aprovechables para el proyecto

El edificio Doctor Angélico presenta problemas de infiltración de aguas lluvias, lo que ha generado encharcamientos en varias zonas de la universidad y ha contribuido al deterioro de la infraestructura. Esta situación justifica la necesidad de implementar medidas de mitigación que permitan gestionar de manera eficiente el agua pluvial y reducir el impacto sobre la edificación. A pesar de que las fachadas del edificio son relativamente jóvenes, la presencia de estos problemas estructurales resalta la urgencia de establecer soluciones permanentes en lugar de depender únicamente de mantenimientos temporales. Los muros de ladrillo y concreto que se evidenciaron cuentan con un albedo bajo por lo que pueden conservar más el calor, pero el aumento de vegetación en esta área disminuiría la intensidad de radiación que pueda llegar a esta (Alchapar & Correa, 2016).

Los problemas estructurales no se limitan a las terrazas occidentales del edificio, sino que afectan diversas áreas de la universidad, lo que hace necesario adoptar estrategias de manejo en múltiples espacios. Como se ha mencionado anteriormente, la terraza del décimo tercer piso es un sitio adecuado para la instalación de techos verdes, contribuyendo a la regulación hídrica y térmica del campus. Asimismo, los espacios internos de la universidad representan una oportunidad para la implementación de otras infraestructuras verdes, que no solo aportarían beneficios ambientales, sino que también generarían impactos sociales positivos en la comunidad estudiantil. De acuerdo con la Secretaría Distrital de Ambiente (2023), la integración de este tipo de entornos tiene un efecto significativo en la cohesión social, promoviendo espacios más inclusivos y sostenibles.

La implementación de fachadas verdes en las estructuras exteriores del campus representa un proyecto de gran magnitud, que si bien implica costos elevados, también ofrece beneficios significativos en términos ambientales, económicos y sociales. Para garantizar su viabilidad, es crucial que cada espacio seleccionado cuente con estudios técnicos, económicos y estructurales detallados, que permitan evaluar su factibilidad y sostenibilidad a largo plazo.

La aprobación de estos jardines verticales por parte de la administración universitaria dependerá de los resultados obtenidos en estos estudios, así como de su impacto en la infraestructura y la comunidad académica. En este sentido, la recopilación de hallazgos, tanto positivos como negativos, permitirá ajustar los criterios de implementación, mejorar los procesos de toma de decisiones y servir como referencia para futuros proyectos de infraestructura verde dentro de la universidad.

Condiciones climáticas y ambientales aprovechables para el proyecto

Las condiciones climáticas actuales en Bogotá D.C., según el análisis realizado, indican un régimen de precipitaciones promedio de 797 mm anuales, lo que la cataloga como una zona con menor cantidad de lluvias en comparación con otras regiones del país. La precipitación

se distribuye aproximadamente en ocho días al mes, con dos temporadas principales de lluvias al año. Sin embargo, la falta de un sistema de drenaje adecuado en algunas áreas de la universidad ha generado problemas recurrentes de encharcamiento e infiltración, afectando la infraestructura del campus.

Para mitigar estos problemas, es fundamental seleccionar especies vegetales capaces de captar grandes volúmenes de agua lluvia, reduciendo la presión sobre el sistema de drenaje y evitando acumulaciones excesivas. En este contexto, las infraestructuras verticales han demostrado ser una solución efectiva. Estudios indican que, en superficies de aproximadamente 139 m², pueden retener entre el 22% y el 55% de la precipitación anual, dependiendo del tipo de sustrato utilizado. Según Lau & Mah (2018), la capacidad de retención varía en función de la composición del suelo, siendo mayor en sustratos como arenas, arenas francas, franco arenosos y francos. Esto implica que una parte significativa del agua de lluvia que caiga sobre el edificio Doctor Angélico será drenada progresivamente a través del sistema de muros verdes, contribuyendo a una mejor gestión del recurso hídrico y a la reducción de problemas de infiltración en el campus.

En términos de temperatura, Bogotá presenta un promedio anual de 13.1 °C, con temperaturas máximas medias entre 18 y 20 °C durante el mediodía. Gran parte de este calor se acumula en las edificaciones, incrementando la temperatura intramural, por lo que en el proyecto las especies seleccionadas deben tener puntos óptimos de germinación basado en estas temperaturas. En estudios realizados en climas mediterráneos, donde las temperaturas oscilan entre 20 y 21 °C, con mínimas invernales de -12 °C y máximas estivales de hasta 46 °C, se ha evidenciado que los muros verdes pueden reducir la temperatura de la superficie hasta en 0,63 °C en verano y conservar 0,54 °C en invierno. En el contexto de Bogotá, la implementación de muros verdes podría contribuir a la regulación térmica pasiva, reduciendo la temperatura interna de los espacios y minimizando la necesidad de climatización artificial lo que se traduce en un menor consumo energético (Oquendo-Di Cosola, Olivieri, Olivieri, & Ruiz-García, 2023). Sin embargo Bogotá al no tener climas extremos no frecuenta el uso de sistemas de regulación como la climatización artificial lo cual vendría siendo un beneficio imperceptible que se presenta con la implementación de los muros verdes y que no tiene tanta relevancia, sin embargo al ser un proyecto fácilmente adaptable se puede tener en consideración este tipo de proyectos en otras sedes de la universidad donde si sea relevante este beneficios generado.

En cuanto a la radiación solar, las terrazas del edificio reciben en promedio 6.000 Wh/m², con picos más bajos en marzo, alcanzando valores cercanos a 5.000 Wh/m². Durante los meses secos, se registra un promedio de seis horas diarias de luz solar directa, mientras que en los meses lluviosos esta cifra disminuye a cuatro horas diarias. Sin embargo, debido a la orientación de las terrazas, la radiación solar no incide de forma directa sobre los muros, sino que se refleja en otras superficies. Esto genera un entorno más seguro para el desarrollo de las plantas, por lo que se recomienda el uso de especies adaptadas tanto a radiación solar directa como a condiciones de semisombra.

Actualmente, el edificio Doctor Angélico cuenta con características estructurales que le otorgan un albedo aproximado de 0,4, valor característico del hormigón (Global Cement and Concrete Association, s.f.). Sin embargo, estudios sobre el efecto de sombreado de infraestructuras verdes con especies trepadoras han demostrado que pueden reducir la radiación solar hasta en un 90%. Esto sugiere que la implementación de muros verdes en este edificio podría mejorar significativamente el confort térmico en su interior, reduciendo la absorción de calor y la temperatura superficial de los muros (Sobhie Muñoz & de Castro Fontes, 2022).

Por otro lado, la velocidad y dirección del viento juegan un papel clave en la dispersión de contaminantes atmosféricos. Este tipo de infraestructuras vegetadas no solo contribuyen a la retención de partículas suspendidas en el aire, sino que también pueden capturar otros contaminantes perjudiciales para la salud humana. En este caso, la mayoría de los vientos en Bogotá presentan velocidades promedio de 2,7 m/s y provienen predominantemente del nororiente de la ciudad, lo que favorece el transporte de contaminantes hacia el occidente. Dado que las terrazas del edificio tienen una orientación hacia el norte, es probable que reciban una mayor carga de estos contaminantes.

Si bien los niveles de contaminación en la zona no superan los límites establecidos por la normatividad vigente, se encuentran cerca de alcanzar estos valores, lo que hace necesario implementar medidas pasivas de mitigación. Los muros verdes pueden desempeñar un papel clave en este sentido, ya que contribuyen a la eliminación de contaminantes atmosféricos mediante procesos como la deposición seca, el secuestro de dióxido de carbono (CO_2) a través de la fotosíntesis y la reducción de la formación de smog al disminuir la temperatura ambiente. Según Wang, Bakker, de Groot y Wörtche (2014), este tipo de infraestructuras pueden reducir la concentración de contaminantes atmosféricos en los siguientes rangos: 0,1–0,5% para NO_2 , 0,1–0,8% para O_3 , 0,1–0,7% para SO_2 , 0,2–1,4% para PM_{10} y 0,001–0,003% para CO .

En términos de humedad relativa, es fundamental considerar que las especies seleccionadas para la implementación de los muros verdes deben ser compatibles con las condiciones promedio de la ciudad de Bogotá, las cuales oscilan entre el 75% y el 83%. Esta característica es crucial para garantizar el adecuado desarrollo y mantenimiento de la vegetación, evitando problemas asociados a la falta o exceso de humedad en el sistema. Además, la elección de especies adaptadas a estos niveles de humedad permitirá optimizar la eficiencia del muro verde en términos de retención de agua, regulación microclimática y resiliencia frente a las variaciones ambientales.

Selección de muros verdes adecuados para el proyecto

A partir de las descripciones de los diferentes tipos de jardines verticales, podemos discernir cuál se adapta mejor a las necesidades del proyecto. Para el edificio Doctor Angélico, que presenta problemas de infiltración, no se debe optar por sistemas de muros verdes directos, ya que podrían permitir la entrada de agua a través del riego y dañar la infraestructura. Por lo tanto, el enfoque del proyecto se centrará en obtener los beneficios de estas infraestructuras sin afectar los componentes actuales del edificio.

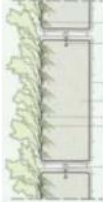
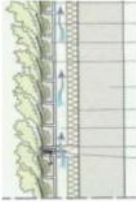
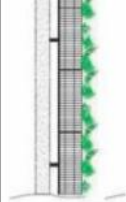
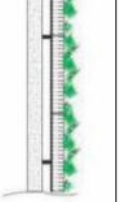
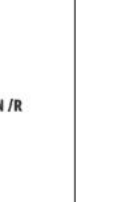
En cuanto a los sistemas indirectos, se deben considerar aquellos que no sean discontinuos, ya que lo que se requiere es intervenir directamente el muro, evitando soluciones como macetas o contenedores independientes que no ofrezcan uniformidad en su diseño.

Basándonos en la clasificación proporcionada por la Secretaría Distrital de Ambiente y relacionándola con las referencias de proyectos previos, podemos concluir que las mejores opciones para este proyecto son los sistemas indirectos continuos. Estos sistemas no tienen contacto directo con el muro, sino que se sobreponen al mismo mediante una subestructura, lo que garantiza la integridad de la infraestructura existente. Sin embargo, se tiene que los sistemas lineales dentro de esta clasificación, como los contenedores horizontales o estructuras verticales y retículas, no se ajustan a la idea de "muros verdes" para este proyecto, ya que requieren una estructura metálica visible que sostenga el sistema. Según los proyectos agrupados por Cárdenas (2021) en su estudio, estos sistemas son más apropiados para fachadas de gran altura, donde las enredaderas pueden contribuir a un valor estético notable. Sin embargo, las terrazas del Doctor Angélico no son de gran altura, por lo que estos sistemas no serían adecuados.

Abordando con más exactitud estas categorías, las soluciones verticales más adaptables en este proyecto son los sistemas modulares y adheridos, los cuales pueden ofrecer una solución viable para la instalación de los muros verdes. Tanto los sistemas hidropónicos como los basados en sustratos cumplen con las necesidades del proyecto, aunque la opción hidropónica, al no requerir sustrato, representa una menor carga para la estructura y podría proporcionar mejores resultados, siempre y cuando se seleccione la vegetación adecuada.

Para relacionar estas clasificaciones que se mostraron con las actuales tendencias de los proveedores, se utilizará la clasificación de los sistemas de jardines verticales que la Secretaría Distrital de Ambiente también brinda en su “guía de infraestructura vegetada, techos verdes y jardines verticales”.

Ilustración 23. Sistemas de jardines verticales más utilizados.

SISTEMAS DE JARDINES VERTICALES							
CLASIFICACIÓN	SISTEMAS SUSTRATO PESADO (SARROCEL, MACEDONIS, CONTENEDORES) (autoportante o colgante)	SISTEMAS CON SUSTRATO LIGERO (SISTEMA DE BANDEJAS)		SISTEMAS HIDROPÓNICOS			
		1. PÁNELES PLÁSTICOS	2. PÁNELES METÁLICOS	1. ESPUMAS (FOAM)	2. FIELTROS GEOTEXTILES	3. LANAS MINERALES FIBRAS	4. SISTEMA AEROPÓNICO
SISTEMAS COMERCIALES	Eco-bin Leaf Box Green waves system	Parabienta VGM Green Wall	Muros verdes vivos	Sistema F+P Living EcoWall® Fytowall-Phytogreen	Le mur vegetal - El muro vegetal (Patrick Blanc)	GSky Pro Wall System Sistemas Wallflore	Richard Stoner (Nasa) Sistema nebulosa
IMAGEN CONCEPTUAL DEL SISTEMA							N / R

Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2023)

Como se menciona en la tabla anterior, tanto los sustratos orgánicos como los sustratos inertes son los más utilizados en la actualidad. Con base en los criterios descritos previamente, podemos determinar cuál de estos sería el más adecuado para recomendar al proveedor. Por un lado, los sistemas con sustratos pesados no son una opción óptima, ya que, como se mencionó anteriormente, no se busca agregar cargas al muro que puedan afectar la estructura actual. En concordancia a esto, las opciones viables son los sustratos ligeros y los sustratos inertes o sistemas hidropónicos.

Ambos sistemas requieren una densidad de plantación adecuada para evitar que los materiales sean afectados. Sin embargo, este aspecto lo tienen en cuenta los proveedores, quienes, basados en las fichas técnicas de sus materiales, nos indican la densidad de plantación que cada sistema requiere. Un ejemplo de esto es la ficha técnica proporcionada por NaturalBox, que utiliza un sistema de sustrato ligero con paneles textiles (Anexo 7. Cotizaciones y fichas técnicas)

Selección de especies vegetales

Para la selección de especies vegetales, y con base en los criterios previamente establecidos, se identificaron 28 especies que cumplen con los requisitos del proyecto y contribuyen a su viabilidad. La elección de estas plantas tiene como objetivo garantizar la adaptación y sostenibilidad de los muros verdes, asegurando su funcionalidad en términos de eficiencia hídrica, resistencia a las condiciones climáticas locales y bajo mantenimiento. Además, se busca maximizar los beneficios ambientales y estéticos dentro del campus, mejorando la calidad del aire, la regulación térmica y la biodiversidad. La lista completa de especies seleccionadas se encuentra en el Anexo 2. Evaluación de selección (especies).

5.1.2. Viabilidad económica

Selección de empresa

A partir del análisis de costos y la valoración porcentual realizada sobre las distintas empresas, se determinó que “Sustentar” es la opción más adecuada para la instalación de los muros verdes. Esta empresa se destaca por su sostenibilidad económica y su alto porcentaje de aprobación en los criterios evaluados, junto con su amplia experiencia y cumplimiento de criterios, se suma que es la segunda más económica entre las 5 empresas valoradas. Los detalles y justificación de esta selección se encuentran en el Anexo 3. Evaluación de selección (empresas) y Anexo 4. Costos vida útil, donde se presentan los datos comparativos y el respaldo técnico de la decisión.

Valorización de beneficios socio ambiental y económico

De los 26 valores con posibilidad de cuantificar, se obtuvo que se pueden utilizar 15 de estos debido a que algunos representan beneficios que no pueden ser trasladados al proyecto, como el ahorro en la energía debido a que las zonas afectadas por las terrazas no tiene sistema de refrigeración o calefacción que permita un ahorro. Los servicios ecosistémicos que se lograron transferir se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 8. Valores transferidos al proyecto

Servicio ecosistemico	Beneficio	Valor a transferir	Unidades	Ajustes
Regulación de la calidad del aire	Mejora de la calidad del aire (PM2.5)	0,37	€/ hogar /1 ug/m3 de disminución de la concentración / año	PPA & IPC
	Mejora de la calidad del aire (PMx)	8176	COP / m2 / año	IPC
	Mejora de la calidad del aire (SO2)	259,37	COP / m2 / año	IPC
	Regulacion de contaminantes del aire	19	¥ / hogar / año	PPA & IPC
	Captura de carbono	2,30	Kg/m2	Impuesto al carbono \$25.799,56 COP /TonCO2eq
	Atenuacion de ruido (Interior y Exterior)	102,06	COP / persona / año	IPC
		340,19	COP / persona / año	IPC
		20	€/ dB reducidos / persona / año	PPA & IPC
Regulación de eventos extremos	Regulación de inundaciones	1,48	€/ hogar / 1% disminución del riesgo de inundacion / año	PPA & IPC
		0,14	€/ m2 / año	PPA & IPC
Regulación del agua	Regulación del drenaje de agua pluvial	0,16	€/ m2 / año	PPA & IPC
Regulación del clima	Regulación de la temperatura	8,85	€/ hogar/1ºC refrigeracion local / año	PPA & IPC
Fotosíntesis, ciclo de nutrientes, polinización	Aumento de la biodiversidad	62410	COP/hogar/año	IPC
		37,88	£ / hogar / año	PPA & IPC
Valor Estetico	Mejora en la estetica	53,60	€/ hogar / año	PPA & IPC

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver muchos de esos valores están en otras monedas o corresponden a otros años. Por lo tanto, realizando los ajustes a partir de ciertas variables como el IPC, el PPA y el PIB per cápita, junto con un nivel de elasticidad aplicado se pudieron hallar los diferentes valores en pesos colombianos capaces de analizar con indicadores de rentabilidad.

Tabla 9. Ejemplo de Actualización de precios por IPC promedio.

Ajustes IPC						
	Valor a transferir	Unidades	Año		IPC ANUAL	
	Regulacion de la calidad del aire				Año	IPC
Mejora de la calidad del aire (PMx)	\$ 8.176,00	COP / m2 / año	2021		2021	5,62%
	\$ 8.635,49	COP / m2 / año	2022		2022	13,12%
	\$ 9.768,47	COP / m2 / año	2023		2023	9,28%
	\$ 10.674,98	COP / m2 / año	2024		2024	5,20%
Actualizado	\$ 11.230,08	COP / m2 / año	2025		2025	%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Ejemplo de ajuste por PPA y sus respectivas tasas de cambio.

Ajustes PPA & IPC						
Beneficio	Valor a transferir	Unidades	País	PIB per capita, PPA (USD)	Valor real	Unidades
Regulacion de la calidad del aire						
Mejora de la calidad del aire (PM2.5)	0,37	€/hogar/1 ug/m3 de disminución de la concentración / año	Países bajos	78.102	\$ 815,86	COP / hogar /1 ug/m3 de disminución de la concentración / año

Fuente: Elaboración propia.

Con los ajustes realizados, se procedió a trasladar los valores de Disposición a Pagar (DAP) a las condiciones actuales del proyecto, considerando el número de personas impactadas y el área bruta estimada. Este proceso permitió contextualizar la magnitud de los beneficios dentro del Campus Doctor Angélico. Gracias a los datos suministrados por el área de planeación de la Universidad se determinó que en el edificio frecuentan un total de 2.447 personas, incluyendo administrativos, estudiantes y docentes, lo que resultó en valores elevados de valoración para ciertos beneficios, dada la naturaleza social de muchos de estos criterios.

Asimismo, los valores de DAP por metro cuadrado incrementaron significativamente los beneficios proyectados, dado que el área estimada del proyecto es de 176,4 m². Como resultado, se identificó que gran parte de estos beneficios superan los 3 millones de pesos anuales, obteniendo un DAP promedio de \$45.162.212 COP.

Ilustración 24. Ejemplo de valoración de beneficios ambientales al contexto del proyecto

Regulación de la temperatura		
Indicador	Valor	Unidades
DAP de un hogar. Por muros verdes que disminuyan 1% la refrigeración local	\$ 22.434	COP / hogar / año
Cantidad de personas por hogar (DANE)	2,84	Personas / hogar
DAP de una persona. Por muros verdes que reduzcan 1% la refrigeración local	\$ 7.899,41	COP / persona / año
Cantidad de personas que frecuentan el Edificio Doctor Angelico	2447	Personas
DAP por muros verdes que disminuya 1% la refrigeración local	\$ 19.329.862,94	COP / año

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, es importante considerar que muchos de estos valores provienen de métodos de valoración aplicados en otros países, lo que implica diferencias en términos de variables socioeconómicas y culturales. Para estimar con mayor precisión la Disposición a Pagar en Colombia por muros verdes, sería necesario un estudio más detallado y ajustado a las particularidades del contexto local, lo que también representa una oportunidad para futuros proyectos de investigación en esta área.

No obstante, con estos valores ajustados, se podrá desarrollar un Análisis Beneficio-Costo que contemple escenarios de sensibilidad, lo que permitirá evaluar la solidez del proyecto ante posibles variaciones en los valores estimados.

Todo este análisis y la valoración de beneficios se encuentran detallados en el Anexo 5 - Transferencia de Beneficios, el cual documenta la metodología utilizada. En este proceso, primero se identificaron y evaluaron los estudios relevantes, posteriormente se seleccionaron y ajustaron los valores a la moneda local, y finalmente, se contextualizaron dentro del proyecto, permitiendo obtener una estimación acorde con las condiciones del Campus Doctor Angélico.

Evaluación de indicadores económicos

El Análisis Costo-Beneficio realizado bajo una tasa de descuento del 5,06% y un horizonte de 50 años arrojó un Valor Presente Neto (VPN) positivo de \$9.083.792.482 COP, lo que indica que el proyecto de muros verdes en el Edificio Doctor Angélico es económicamente viable. Además, el análisis del comportamiento del VPN año a año muestra que, según los valores transferidos de los beneficios ambientales, el proyecto alcanzaría rentabilidad desde el primer año.

No obstante, es importante considerar ciertas incertidumbres en la estimación de beneficios, ya que muchos de estos valores provienen de estudios realizados en países desarrollados con diferentes estructuras socioeconómicas y costos de vida en comparación con Colombia. Esto puede influir en la percepción de la rentabilidad y en la aplicabilidad real de los valores estimados en el contexto local. Por ello se realizó el análisis de sensibilidad del escenario 2.

Tabla 11. Análisis Costo – Beneficio muros verdes Edificio Doctor Angélico

AÑO	Indicadores socio economicos			
	VPN i	VPN e	VPN	RBC
50	\$ 44.853.733	\$ 7.554.918	\$ 37.298.815	5,94
TOTAL	\$ 9.573.230.647	\$ 489.438.165	\$ 9.083.792.482	19,56

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el cálculo de la Relación Beneficio-Costo (RBC) resultó en un valor de 19,55, lo que significa que por cada peso invertido, el proyecto genera un rendimiento social de 19,55 pesos.

Este resultado refuerza la viabilidad del proyecto desde una perspectiva de sostenibilidad y beneficio ambiental, aunque, más que una inversión con retornos económicos directos, debe considerarse como una estrategia a largo plazo para mejorar la calidad ambiental y social del campus.

Es importante resaltar que algunos beneficios tangibles, como la valorización de la propiedad, no pudieron ser calculados debido a las normas institucionales de confidencialidad. Sin embargo, este tipo de infraestructuras no solo aportan beneficios ambientales y económicos, sino que también pueden fortalecer el posicionamiento institucional de la Universidad Santo Tomás en materia de sostenibilidad.

Adicionalmente, los muros verdes pueden facilitar la postulación a diversos programas o certificaciones ambientales orientadas a la construcción sostenible. Un ejemplo de ello es la Resolución 3654 de 2014, que regula el programa “Bogotá Construcción Sostenible”, desarrollado por la Secretaría Distrital de Ambiente. Este programa busca reconocer públicamente proyectos constructivos que incorporen estrategias de eco urbanismo y sostenibilidad, lo que representaría una oportunidad para la universidad de obtener reconocimiento ambiental y acceder a incentivos relacionados con infraestructura verde (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2014).

Análisis de sensibilidad

- Escenario 1.

Este escenario de “beneficios tangibles” permitió estimar los indicadores económicos considerando únicamente los beneficios que impactan directamente los egresos del Edificio Doctor Angélico. Entre estos, se destacan dos aspectos clave:

Beneficio por drenaje de agua pluvial: Se identificaron problemáticas en el edificio relacionadas con la acumulación de agua lluvia, lo que genera costos de mantenimiento en los sistemas de drenaje. La implementación de muros verdes podría reducir la presión sobre estos sistemas, disminuyendo así la frecuencia y costos de mantenimiento correctivo.

Beneficio por regulación de temperatura: La cobertura vegetal de los muros verdes actúa como una segunda piel, protegiendo la fachada del desgaste ocasionado por la radiación solar y los cambios de temperatura. Esta regulación térmica podría disminuir los costos de mantenimiento de la infraestructura, al reducir la degradación de los materiales expuestos a la intemperie.

La estimación de estos beneficios permitió evaluar el impacto económico directo de la implementación de los muros verdes, diferenciándolos de otros beneficios ambientales y sociales que, si bien son relevantes, no generan un ahorro financiero inmediato.

Tabla 12. Escenario de sensibilidad 1

AÑO	Total Ingresos (Escenario 1)	Escenario 1 (Beneficios tangibles)			
		VPN i	VPN e	VPN	RBC
50	\$ 19.422.637	\$ 1.646.032	\$ 89.145.536	-\$ 87.499.503	0,02
TOTAL	\$ 971.131.845	\$ 351.316.295	\$ 1.693.659.279	-\$ 1.342.342.984	0,21

Fuente: Elaboración propia

A diferencia del análisis anterior, en este escenario de beneficios tangibles, el VPN resultó negativo, con un valor de -\$1.342.342.984 COP. Esto indica que, si se consideran únicamente los beneficios asociados a la reducción de costos de mantenimiento por drenaje pluvial y regulación de temperatura, el proyecto no alcanza la viabilidad económica.

Este resultado se debe a que, con el paso del tiempo, el costo de mantenimiento anual crece, mientras que los beneficios económicos se mantienen constantes, lo que afecta la rentabilidad a largo plazo. Sin embargo, el comportamiento del VPN presenta una particularidad. Durante los primeros años, el VPN es positivo, indicando que en esta etapa inicial los beneficios superan los costos. No obstante, a partir del año 12, el VPN se torna negativo, reflejando el impacto del incremento en los costos de mantenimiento.

Por otro lado, la Relación Beneficio-Costo (RBC) obtuvo un valor de 0,21, lo que significa que por cada peso invertido se genera un déficit social de 0,21 pesos. Esto refuerza la conclusión de que, si el análisis se centra únicamente en estos beneficios tangibles, el proyecto no resulta económicamente viable en el largo plazo.

Este escenario evidencia la importancia de incluir beneficios ambientales y sociales en la evaluación económica, así como otros beneficios tangibles como la valorización de la propiedad, dado que este último tiende a crecer año a año y podría generar rentabilidad a largo plazo. Incorporar este tipo de beneficios dentro del análisis de sensibilidad permite reflejar con mayor precisión el impacto real del proyecto, evitando subestimar su potencial económico y social. Además, estos factores pueden influir significativamente en la percepción de valor del proyecto, fortaleciendo su justificación y facilitando la toma de decisiones para su implementación.

- Escenario 2.

Este escenario considera una incertidumbre del 50% en los beneficios ambientales, partiendo de la premisa de que la valoración económica podría estar sobreestimada debido a las diferencias en el contexto socioeconómico entre los países de origen de los datos y Colombia.

Al reducir a la mitad los ingresos proyectados por los beneficios socioambientales, el VPN del proyecto sigue siendo positivo, alcanzando un valor de \$4.297.177.158 COP. Esto indica que, incluso bajo condiciones conservadoras, el proyecto sigue siendo económicamente viable. Sin embargo, se destaca que los valores de los beneficios aún son elevados, ya que la transferencia de beneficios se basó principalmente en Disposiciones a Pagar (DAP), reflejando lo que los hogares o individuos estarían dispuestos a pagar por la construcción del muro verde o por los servicios ecosistémicos asociados, como la mejora de la calidad del aire o la regulación térmica.

Adicionalmente, en este escenario el RBC se mantiene por encima de 1, con un valor de 9,78, lo que implica que por cada peso invertido en el proyecto se obtiene un rendimiento social de 9,78 pesos. Esto refuerza la rentabilidad social del proyecto y su potencial para generar impactos positivos a largo plazo.

Tabla 13. Escenario de sensibilidad 2

AÑO	Total Ingresos (Escenario 2)	Escenario 2 (Incertidumbre 50%)			
		VPN i	VPN e	VPN	RBC
50	\$ 264.629.602	\$ 22.426.867	\$ 7.554.918	\$ 14.871.948	2,97
TOTAL	\$ 13.231.480.100	\$ 4.786.615.324	\$ 489.438.165	\$ 4.297.177.158	9,78

Fuente: Elaboración propia

El análisis completo de viabilidad económica del ABC realizado, junto con los análisis de sensibilidad propuestos, se encuentra detallado en el Anexo 6: Análisis Costo-Beneficio. En este apartado se evidencian, los procedimientos ejecutados y los cálculos fundamentales que sustentan el estudio.

6. REFERENCIAS

- Acueducto Alcantarillado de Bogotá D.C. (2024). *Acueducto*. Obtenido de https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/atencion-al-usuario/tarifas/tarifas_2024
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (20 de Noviembre de 2014). Resolución 3654 de 2014. Bogotá D.C., Colombia. Obtenido de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=60054>
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Secretaría Distrital de Planeación. (2021). Plan de Ordenamiento Territorial, Bogotá Verdece 2022 - 2035. Bogotá D.C.
- Alcaldía Mayor de Bogotá, & Secretaría Distrital de Planeación. (2022). POT. Plan de Ordenamiento Territorial, Bogotá Verdece 2022 - 2035. Decreto 555 de 2021. Bogotá D.C. Obtenido de <https://www.sdp.gov.co/micrositios/pot/que-es>
- Alcaldía Mayor de Bogotá, & Secretaría Distrital de Planeación. (4 de 2022). REGLAMENTACIÓN ECOURBANISMO Y CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE DOCUMENTO DE DIAGNÓSTICO.
- Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría Distrital de Ambiente. (2020). *SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)*. Bogotá D.C.
- Alchapar, N., & Correa, E. N. (2016). Pautas de diseño para disminuir las temperaturas urbanas en regiones con alta productividad solar. Parámetros morfológicos y materiales. *Hábitat Sustentable*, 84 - 95.
- ANLA; MINAMBIENTE. (2017). *Criterios técnicos para el uso de herramientas económicas en los proyectos, obras o actividades objeto de licenciamiento ambiental*.
- Aquino, M. A. (2014). Manual de hidroponía. Mexico.
- Banco Mundial. (s.f.). *Grupo Banco Mundial*. Obtenido de https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PCAP.PP.CD?contextual=default&end=2023&name_desc=false&start=1990&view=chart
- Banoy Velásquez Catherine, & Osorio Duarte Daniel David. (2021). Análisis Costo Beneficio Ambiental de Las Fachadas Verdes Estudio de Caso: Proyecto Cubo Verde. Medellín.
- Cameron, R. W., Taylor, J., & Emmett, M. (2015). A Hedera green façade – Energy performance and saving under different maritime-temperate, winter weather conditions. *Building and Environment*, 111 - 121.
- Cárdenas, T. M. (2021). El jardín vertical como herramienta de mejora del confort urbano. Madrid, España.
- Cattlin, B. (s.f.). *IG.com*. Obtenido de <https://www.ig.com/es/estrategias-de-trading/-que-es-la-paridad-de-poder-adquisitivo--ppa---210223#PPA>
- Centros de Estudios para la Preparacion y Evaluacion Socioeconomica de Proyectos. (2017). *Boletín Número V, Indicadores de Rentabilidad*.
- Collins, R., Schaafsma, M., & Hudson, M. (2017). The value of green walls to urban biodiversity. *64*, 114-123.
- Corporación Autonoma Regional de Cundinamarca. (2017). *Análisis de condiciones hidroclimáticas en jurisdicción de CAR*.
- Departamento Nacional de Planeación. (2022). Resolución número *RAD_R*. Colombia. enel. (s.f.). *enel*. Obtenido de <https://www.enel.com/es/nuestra-compania/historias/articles/2024/05/el-nino-la-nina-enso-que-son>

- Erdem, C. (2017). Thermal regulation impact of green walls: An experimental and numerical investigation. *Applied Energy*, 247 - 254. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916313824>
- FEDEMADERAS. (2024). *FEDEMADERAS*. Obtenido de <https://fedemaderas.org.co/impuesto-nacional-al-carbono/>
- Franco Mateus Sergio Andrés. (2015). Valoración financiera de fachadas verdes: Muros verdes en la ciudad de Bogotá.
- Global Cement and Concrete Association. (s.f.). *Global Cement and Concrete Association*. Obtenido de <https://gccassociation.org/essential-concrete/albedo/>
- González, O. H. (08 de 07 de 2020). Aproximación a los distintos tipos de muestreo no probabilístico. Chile.
- Google. (Junio de 2024). *Google maps*. Obtenido de https://www.google.com/maps/place/Universidad+Santo+Tom%C3%A1s+-+Edificio+Doctor+Ang%C3%A9lico/@4.6563074,-74.0567685,3a,75y,91.41h,120.58t/data=!3m7!1e1!3m5!1s_2PP1XKSolB-pLgS89JGeQ!2e0!6shhttps:%2F%2Fstreetviewpixels-pa.googleapis.com%2Fv1%2Fthumbnail%3F
- IDEAM. (2017). ATLAS climatológico de Colombia. Colombia.
- IFRC. (s.f.). *Las soluciones basadas en la naturaleza. Junto a las comunidades para favorecer la reducción del riesgo de desastres, la adaptación al cambio climático y las medidas de mitigación al respecto, mediante la naturaleza*.
- James, A., Rene, E., Bilyaminu, A., & Chellam, P. (2024). Advances in amelioration of air pollution using plants and associated microbes: An outlook on phytoremediation and other plant-based technologies. *Chemosphere*, 358.
- Lau, J., & Mah, D. (2018). Green wal for retention of stormwater. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 283 - 298.
- Leal del Castillo Gabriel. (3 de 2010). *Ecourbanismo. Ciudad, Medio ambiente y Sostenibilidad* (2 ed.). Bogota D.C.
- Madushika, U., Ramachandra, T., & Zainudeen, N. (2022). ENERGY AND LIFE CYCLE COST SAVING POTENTIAL OF BUILDINGS USING GREEN WALLS: A CASE STUDY FROM SRI LANKA. *Journal of Green Building*, 17(4), 179-197.
- Manso, M., Teotónio, I., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2021). Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- MINAMBIENTE. (2017). *Biodiversidad y servicios ecosistémicos en la planificación y gestion ambiental urbana*. Bogotá D.C. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/BIODIVERSIDAD_Y_SERVICIOS_ECOSISTEMICOS_EN_LA_PLANIFICACION_Y_GESTION_AMBIENTAL_URBANA.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución 2254. Colombia.
- Navrud, S., & Ready, R. (2007). *Environmental Value Transfer: Issues and Methods*. Springer Nature.
- Ochoa, C. (2014). Logit Mixto. *Métodos de elección discreta con simulación*.
- ONU. (2020). Ficha de caso 1.3. Guía para la Integración de las Soluciones Basadas en la Naturaleza en la Planificación urbana Primera Aproximación para Colombia.

- ONU. (s.f.). *mooc.cityadapt*. Obtenido de https://mooc.cityadapt.com/pluginfile.php/379/mod_label/intro/Gu%C3%ADa%20de%20M%C3%B3dulo%201.pdf
- Oquendo-Di Cosola, V., Olivieri, F., Olivieri, L., & Ruiz-García, L. (2023). *Assessment of the impact of green walls on urban thermal comfort in a Mediterranean climate*.
- Palermo, S., Turco, M., Pirouz, B., Presta, L., Falco, S., De Stefano, A., . . . Piro, P. (2023). Nature-based solutions for urban stormwater management: An overview. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1196(1).
- Pérez, G., Coma, J., Barreneche, C., De Gracia, A., Urrestarazu, M., Burés, S., & Cabeza, L. (2016). Acoustic insulation capacity of Vertical Greenery Systems for buildings. *Applied Acoustics*, 110, 218-226.
- Perini, K., & Rosasco, P. (12 de 2013). Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*, 70, 110-121.
- Pontificia Universidad Javeriana. (2023). *Revista Pesquisa Javeriana*. Obtenido de <https://www.javeriana.edu.co/pesquisa/fenomeno-de-el-nino-en-colombia/>
- Reyhani, M., Santolini, E., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (5 de 2022). Assessing the environmental performance of plastic-based and felt-based green wall systems in a life-cycle perspective. *Science of the Total Environment*, 822.
- Rivas Sánchez Yair Andres. (2019). Eficiencia del uso de muros verdes para disminuir los efectos negativos de la pérdida de áreas verdes en las ciudades con el uso de materiales reciclados. Córdoba.
- Salm, J., Bočkarjova, M., Botzen, W., & Runhaar, H. (2023). Citizens' preferences and valuation of urban nature: Insights from two choice experiments. 208.
- Scopus. (2025). *Scopus*. Obtenido de <https://www-scopus-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=5d8cf5057f122c9b788797f818b466f6&sot=a&sdt=a&sessionSearchId=5d8cf5057f122c9b788797f818b466f6&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results>
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (06 de 2015). Evaluación de partículas suspendidas PM2.5 en el Área Metropolitana de Monterrey. Monterrey, Nuevo Leon, Mexico.
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2023). Guia practica, Infraestructura Vegetada, Techos verdes y Jardines Verticales. Bogotá D.C. Obtenido de <https://drive.google.com/file/d/1VCaqwIfajIFi3Iih6t3CGmaOKeytySi5/view>
- Secretaria Distrital de Ambiente. (s.f.). *ambientebogota*. Obtenido de <https://www.ambientebogota.gov.co/evaluacion-de-riesgos-climaticos>
- Secretaria Distrital de Ambiente; Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Jardín Botánico José Celestino Mutis. (2021). Catálogo de especies vegetales Fichas técnicas Techos verdes y jardines verticales. Bogotá D.C. Obtenido de <https://www.ambientebogota.gov.co/techos-verdes-y-jardines-verticales>
- Sierra Bautista, A. L., & García Arévalo, E. A. (2018). Diseño y análisis espacial de una red de infraestructura verde para la localidad Rafael Uribe Uribe. Bogotá D.C.
- Şimşek, Ü., & Şenyiğit, Ö. (2020). Examination of vertical green systems in educational buildings: a field study in Çukurova University. *Journal of Design for Resilience in Architecture and Planning*.

- Sobhie Muñoz, L., & de Castro Fontes, M. S. (2022). Green facades and its shading potential: The solar radiation attenuation promoted by climber species. *Will cities survive?*, (pág. 7). Chile.
- SunEarthTools.com*. (s.f.). Obtenido de https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es
- Teotónio, I., Oliveira Cruz, C., Matos Silva, C., & Lopes, R. (2023). Bridging CBA and MCA for evaluating green infrastructure: Proposal of a new evaluation model (MAGICA). 85.
- Tiago, P., Leal, A., & Silva, C. (2024). Assessing Ecological Gains: A Review of How Arthropods, Bats and Birds Benefit from Green Roofs and Walls. *Environments - MDPI*, 11(4).
- Universidad Santo Tomas. (s.f.). *Santoto 360°*. Obtenido de <https://santotoprincipal1.github.io/>
- Veisten, K., Smyrnova, Y., Klæboe, R., Hornikx, M., Mosslemi, M., & Kang, J. (2012). Valuation of green walls and green roofs as soundscape measures: Including monetised amenity values together with noise-attenuation values in a cost-benefit analysis of a green wall affecting courtyards. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9(11), 3770-3778.
- Wang, Y., Bakker, F., de Groot, R., & Wörtche, H. (2014). Effect of ecosystem services provided by urban green infrastructure on indoor environment: A literature review. 77, 88-100.
- Zhang, X., Ni, Z., Wang, Y., Chen, S., & Xia, B. (2020). Public perception and preferences of small urban green infrastructures: A case study in Guangzhou, China. *Urban Forestry and Urban Greening*, 53.