



Instituto Politécnico Nacional
Secretaría de Investigación y Posgrado



Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre
Medio Ambiente y Desarrollo

Doctorado en Ciencias en Estudios Ambientales y de la
Sustentabilidad

Tesis doctoral

“Techos verdes una solución sustentable para la adaptación al cambio
climático en la Ciudad de México”

Presenta:

M. en C. Ana Laura Cervantes Nájera

Directora:

Dra. María Concepción Martínez Rodríguez

Comité tutorial:

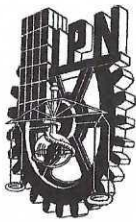
Dra. Marta Bárbara Ochman Ikanowicz

Dr. Carlos Felipe Mendoza

Dr. Ángel Refugio Terán Cuevas

Dr. Roberto Ariel Abeldaño Zuñiga

Ciudad de México, 28 de noviembre 2025



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-13
REP 2017

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, a de del

El Colegio de Profesores de Posgrado de en su Sesión No. celebrada el día del mes de conoció la solicitud presentada por el (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Cervantes	Apellido Materno:	Nájera	Nombre (s):	Ana Laura
-------------------	-----------	-------------------	--------	-------------	-----------

Número de registro:

del Programa Académico de Posgrado:

Referente al registro de su tema de tesis; acordando lo siguiente:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

Objetivo general del trabajo de tesis:

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Director: 2° Director:

No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:


que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

Director(a) de Tesis


2° Director de Tesis (en su caso)


Dra. María Concepción Martínez Rodríguez
Aspirante


Ana Laura Cervantes Nájera


Presidente del Colegio

Dr. Pedro Francisco Rodríguez Espinosa


SECRETARÍA DE EDUCACIÓN
PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL
DIRECCIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14
REP 2017

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 9:00 horas del día 28 del mes de noviembre del 2025 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de: CIEMAD para examinar la tesis titulada:

Techos verdes una solución sustentable para la adaptación al cambio climático en la Ciudad de México del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Cervantes	Apellido Materno:	Nájera	Nombre (s):	Ana Laura
--------------------------	-----------	--------------------------	--------	--------------------	-----------

Número de registro: A 2 2 0 2 2 5

Aspirante del Programa Académico de Posgrado: Doctorado en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 2 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI NO SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN: *(Por ejemplo, el % de similitud se localiza en metodologías adecuadamente referidas a fuente original)*


Se presentó un 2% de similitud en el trabajo de tesis, se dieron los créditos correspondientes a cada uno de los autores citados en el trabajo, mismos que se encuentran en la sección de referencias

****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**


Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:


Se cumplió con lo establecido en el Reglamento de Estudios de Posgrado vigente.


Dra. María Concepción Martínez Rodríguez
Director de Tesis
Nombre completo y firma


Dra. Marta Bárbara Ochman Ikanowicz
Nombre completo y firma

COMISIÓN REVISORA DE TESIS

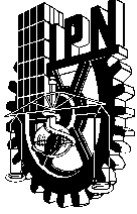

Dr. Ángel Refugio Terán Cuevas
Nombre completo y firma


Dr. Roberto Ariel Abeldañó Zuñiga
Nombre completo y firma


Dr. Carlos Felipe Méndez
Nombre completo y firma


Dr. Pedro Francisco Rodríguez Espinosa
Nombre completo y firma

PÚBLICA
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE
PROFESORES
INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL
CIEMAD
DIRECCIÓN
Página 1 de 1



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN

En la Ciudad de México el día **28** del mes de **noviembre** del año de **2025**, la que suscribe **Ana Laura Cervantes Nájera** alumna del programa de **Doctorado en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad** con número de registro **A220225**, adscrita al Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de **María Concepción Martínez Rodríguez** y ceden los derechos del trabajo intitulado **“Techos verdes una solución sustentable para la adaptación al cambio climático en la Ciudad de México”**, al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expresado de la autora y directora. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones de correo: **cer.lau.ana.18@gmail.com**, **mcmartinezr@ipn.mx**. Si el permiso se otorga, al usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

Ana Laura Cervantes Nájera

DEDICATORIA

A Titi, aunque partió antes de verme culminar este sueño, siempre me apoyó y me amó incondicionalmente. Tu recuerdo me acompaña siempre.

A mi esposo Bruno y a mi hijo Héctor, mis pilares. Gracias por ser mi motor e inspiración diaria, por su paciencia, sus porras y entender mis ausencias. Los amo profundamente.

A mis padres, hermana, hermano y sobrinas, gracias por no soltarme en ningún momento de mi camino. Los amo.

A mis amigos, quienes se han convertido en familia; gracias por vernos crecer, evolucionar y acompañarnos a lo largo de la vida.

Y finalmente, a mí misma, por la resiliencia, por no haberme rendido y por creer en mí aún en los momentos que creí eran los más difíciles.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a mi directora de tesis, la Dra. María Concepción Martínez Rodríguez, por su mentoría durante esta investigación doctoral. Gracias por su apoyo incondicional, por impulsarme a crecer profesionalmente y por brindarme el espacio para desarrollarme con un enfoque transdisciplinario.

Agradezco a los miembros de mi comité tutorial, la Dra. Marta Barbara Ochman Ikanowicz, Dr. Roberto Ariel Abeldaño, Dr. Ángel Refugio Terán Cuevas y el Dr. Carlos Felipe Mendoza. Gracias por su asesoría, tiempo, valiosas observaciones y aportación de ideas que me permitieron robustecer esta investigación.

A mi alma mater, Instituto Politécnico Nacional (IPN) y al CIEMAD, por ser el espacio en el que me he desenvuelto académicamente, y a sus profesores, quienes con su expertise me han guiado y abierto nuevas perspectivas en la investigación.

Un agradecimiento especial a las instituciones que hicieron posible este posgrado de tiempo completo a través de su financiamiento:

- A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, por la beca otorgada.
- A la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP), por el financiamiento brindado a través de la Convocatoria 2022 de proyectos de innovación tecnológica, lo cual permitió la instalación del techo verde ligero extensivo (TVLE).
- Al Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI), por las becas otorgadas para mis actividades académicas de divulgación e investigación.
- A la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas (COFAA), por el respaldo económico para realizar mi estancia de investigación en la Universidad de Toronto, Canadá.

Agradezco a las siguientes personas, instituciones y organizaciones por facilitar el acceso a sus espacios y permitir la realización del trabajo de campo:

- Biól. Jerónimo Reyes Santiago – Académico del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Lic. Rosario Tayanara Calva Hernández - Jefa Del Área "General E Inmobiliario" del Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT).
- Biol. Jose Carlos Alaniz E. - Coordinador de sustentabilidad American School Foundation (ASF).
- Lic. Itziar de Luisa - Presidenta de la Asociación de Colonos ZEDEC de Santa Fe (ZEDEC, SF A.C.).

Agradezco a los amigos que el CIIEMAD me regaló: Shadad, Andrés, Xóchitl, Milena, Mineli, Mariana y Marisol, a pesar de tener diferentes líneas de investigación, compartimos este camino doctoral con todos sus matices.

Finalmente, reconozco y agradezco a los integrantes del equipo Sustentaterra: Samantha, Catherine, Esperanza, Diego y Héctor, por su amistad, compañerismo, trabajo y esfuerzo con el que hemos desarrollado el proyecto de divulgación de las ciencias ambientales en diversos formatos, realizado bajo la dirección de la Dra. María Concepción.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE FIGURAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS.....	12
RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUCCIÓN	15
Justificación	17
Pregunta de investigación	17
Hipótesis.....	17
Objetivo general.....	18
Objetivos específicos	18
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	19
1.1 Adaptación al cambio climático en las ciudades	20
1.2 Definición y dimensiones de la sustentabilidad en las ciudades	25
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	28
2.1 Techos verdes como estrategia de adaptación al cambio climático.....	29
2.2 Visión internacional para la adopción de techos verdes.....	35
2.2.1 Políticas y estrategias	36
2.2.2 Planes nacionales y locales	40
2.2.3 Estándares nacionales y locales	42
2.2.4 Desafíos y limitaciones	44
CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO.....	45
3.1 Ciudad de México (CDMX).....	46
3.1.1 Antecedentes de las áreas verdes urbanas (AVU)	48
3.1.2 Cambio climático y estrategias sustentables para su adaptación	50
3.1.3 Techos verdes como AVU en la CDMX.....	52
3.2 Techo verde ligero extensivo (TVLE) como alternativa al techo verde convencional (TVC) 54	
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	58
4.1 Generalidades de la metodología.....	59
4.2 Implementación de un TVLE como alternativa al TVC.....	61
4.3 Impacto ambiental del TVLE y de los TVs (inventario) en la CDMX	63
4.3.1 Creación del inventario de techos verdes de la CDMX.....	63
4.3.2 Análisis de la calidad de vegetación y captación de CO ₂	64
4.3.2.1 Cálculo de la captación de CO ₂	67

4.3.3	Análisis cualitativo de la calidad de la vegetación en techos verdes de estudio	68
4.3.4	Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	70
4.3.5	Impacto a la temperatura: absorción de radiación solar (RS)	72
4.3.6	Análisis de decisiones multicriterio en Sistema de Información Geográfica (SIG)	74
4.4	Impacto Social de los techos verdes en la CDMX.....	80
4.4.1	Diseño y validación del instrumento cualitativo	80
4.4.2	Aplicación de los instrumentos cualitativos	83
4.5	Evaluación económica del TVLE en la CDMX	85
4.5.1	Análisis costo – beneficio (ACB)	85
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES		88
5.1	Impacto ambiental.....	89
5.1.1	Inventario de techos verdes de la CDMX	89
5.1.2	Análisis de la calidad de vegetación y captación de CO ₂ mediante MSAVI	93
5.1.2.	Análisis cualitativo por medio del índice VARI	101
5.1.3	Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	110
5.1.4	Análisis del rendimiento térmico	116
5.1.5	Análisis de decisiones multicriterio basado en SIG	124
5.3	Impacto Social	132
5.3.1	Frecuencia de visita a los sitios con techos verdes.....	132
5.3.2	Comprensión y percepción de los techos verdes en la CDMX.....	133
5.3.3	Análisis comparativo de estrategias y enfoques para la implementación de techos verdes 145	
5.3.4	Desafíos y oportunidades en la implementación.....	149
5.3.5	Barreras identificadas para la implementación de techos verdes.....	151
5.4	Impacto económico del TVLE en la CDMX.....	154
5.4.1	ACB.....	154
5.5	Recomendaciones estratégicas.....	157
5.5.1	Normatividad.....	157
5.5.2	Diseño.....	158
5.5.3	Seguimiento	158
5.6	Alcance y limitaciones de la investigación	159
CONCLUSIONES		160
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		164
ANEXO 1		185
ANEXO 2.....		195

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de leyes y ordenanzas	39
Tabla 2. Planes y políticas.....	41
Tabla 3. Estándares	43
Tabla 4. Métodos según la dimensión de la sustentabilidad.....	60
Tabla 5. Variables de la metodología	60
Tabla 6. Detalle de la estructura del TVLE del CIEMAD.....	61
Tabla 7. Techos verdes de estudio	66
Tabla 8. Interpretación Índice VARI	70
Tabla 10. Comparación de captura de CO ₂	100
Tabla 11. Inventario de materiales para la elaboración del ACV comparativo.....	110
Tabla 12. Consideraciones de transporte para el ACV.....	113
Tabla 13. Comparación del impacto por transporte en el ACV del TVLE y el TVC	115
Tabla 14. Huella de carbono a partir de los resultados del ACV	116
Tabla 15. Radiación solar en el TVLE.....	119
Tabla 16. Variación de temperatura y ahorro energético.....	121
Tabla 17. Ahorro energético estimado por temporada	122
Tabla 18. Resultados potenciales según el nivel de prioridad	126
Tabla 19. Tipología y cantidad de inmuebles proyectados para implementar TVLE	126
Tabla 20. Distribución de la cantidad de personas entrevistadas	132
Tabla 21. Beneficios, emociones y percepciones (R: Responsables; U: Usuarios)	140
Tabla 22. Estrategias y enfoques de las políticas públicas para la implementación de techos verdes.....	146
Tabla 23. Comparativo de costos por capa constructiva: TVLE vs TVC	154
Tabla 24. Comparativo resultados ACB: TVLE vs TVC	155
Tabla 25. Ahorro energético y económico anual estimado por especie en el TLVE	155
Tabla 26. Estimación del impacto energético y económico	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interconexión de conceptos.....	57
Figura 2. Diagrama general de la metodología.....	59
Figura 3. TVLE del CIEMAD con MOR fibra de coco-paja como capa drenante.....	62
Figura 4. Mapa networking para la creación del inventario de techos verdes en la CDMX.....	64
Figura 5. Proceso para el análisis de calidad de vegetación.....	66
Figura 6. Escala de colores del índice MSAVI.....	67
Figura 7. Proceso para la evaluación del VARI.....	70
Figura 8. Diagrama de flujo simplificado del ciclo de vida del TVLE.....	71
Figura 9. Disposición de las especies de flora en el TVLE.....	73
Figura 10. Flujo de trabajo para seleccionar sitios potenciales a implementar techos verdes en áreas prioritarias de la CDMX.....	79
Figura 11. Metodología cualitativa del análisis del impacto social.....	84
Figura 12. Proceso para el cálculo del ACB.....	87
Figura 13. Mapa inventario de techos verdes en la CDMX.....	89
Figura 14. Terrazas del Alcázar.....	90
Figura 15. Evolución de techos verdes en la CDMX (1999–2023).....	92
Figura 16. Desarrollo de techos verdes por alcaldía.....	92
Figura 17. Ejemplo de la base de datos visual del inventario de techos verdes.....	94
Figura 18. Índice MSAVI en temporada de lluvias y de secas de los techos verde de estudio.....	96
Figura 19. Índice VARI del techo verde del Jardín Botánico de la UNAM.....	102
Figura 20. Índice VARI del techo verde de las Oficinas del Infonavit.....	104
Figura 21. Índice VARI techo verde en el Wellness Center “Jenkins” (WEC) de la American School Foundation.....	105
Figura 22. Índice VARI techo verde en el Fine Arts Center (FAC) de la American School Foundation.....	106
Figura 23. Índice VARI techo verde Jardín contemplativo del PLM.....	107
Figura 24. Índice VARI techo verde Skatepark del PLM.....	108
Figura 25. Índice VARI de los TVLE del CIEMAD-IPN.....	109
Figura 26. Diagrama de flujo para el ACV simplificado del TVLE.....	112
Figura 27. Modelo gráfico del sistema de producto del TVLE.....	113
Figura 28. Modelo gráfico del sistema de producto del TVC.....	114
Figura 29. Comparación del impacto por uso recursos en el ACV del TVLE y el TVC.....	115
Figura 30. Gráfica de la cobertura vegetal 2022-2024.....	118
Figura 31. Distribución de la radiación solar (RS) en temporada de lluvias en el TVLE.....	120
Figura 32. Distribución de la radiación solar (RS) en temporada de secas en el TVLE.....	120
Figura 33. Desempeño térmico superficial promedio en el TVLE.....	122
Figura 34. Identificación de sitios potenciales a colocar TVLE.....	125
Figura 35. Evolución y prospección de indicadores sustentabilidad en CDMX.....	130
Figura 36. Frecuencia de visita de los usuarios.....	133
Figura 37. Nube de palabras.....	134
Figura 38. Matriz del conocimiento de los responsables y usuarios.....	139
Figura 39. Interacciones entre barreras y beneficios percibidos en los techos verdes.....	150

LISTA DE ABREVIATURAS

Ciudad de México (CDMX)
Áreas verdes urbanas (AVU)
Solución basada en la naturaleza (SbN)
Servicios ecosistémicos (SE)
Economía circular (EC)
Techo verde ligero extensivo (TVLE)
Huella de carbono (HC)
Techo verde convencional (TVC)
Infraestructura Verde Urbana (IVU)
Análisis de costo-beneficio (ACB)
Análisis de ciclo de vida (ACV)
Materiales orgánicos residuales (MOR)
Dióxido de carbono (CO₂)
Sistema de Información Geográfica (SIG)
Gases de efecto invernadero (GEI)
Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)
Sistemas de drenaje sustentable (SUDS),
Isla de calor urbano (ICU)
Toneladas de dióxido de carbono (tonCO₂)
Google Earth Pro (GEP)
Crop Monitoring (CM)
MSAVI (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index)
EOS Data Analytics (EOSDA)
Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP)
Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD)
Instituto Politécnico Nacional (IPN)
Partes por millón (ppm)
Índice de Vegetación por Diferencia Normalizada Verde-Rojo (VARI)
Jardín Botánico del Instituto de Biología (JB-IB)
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Jardín contemplativo. Parque La Mexicana (PLM)
American School Foundation (AFS)
Fine Arts Center (FAC)
Wellness Center (WEC)
Ahorro energético (Qe)
Área sin vegetación (ASV)
Radiación solar (RS)
Temperatura superficial (Ts)
Temperatura ambiental (Tamb)
Ahorro energético anual por especie (AES).
Análisis de decisiones multicriterio (ADM)
Temperatura de la superficie terrestre (TST)
Índice de prioridad de instalación de techos verdes (IPTV)
Costo evitado (CE)
Aire acondicionado (AC)
Costo económico diario (CD)
Consumo energético promedio (CEP)
Valor Presente Neto (VPN)
Período de recuperación (PR)

RESUMEN

La Ciudad de México (CDMX) ha sufrido cambios en el uso de suelo que han derivado en la disminución de áreas verdes urbanas (AVU). El techo verde es una solución basada en la naturaleza (SbN) empleada en ciudades para adaptarlas al cambio climático, recuperar AVU y sus respectivos servicios ecosistémicos (SE). El objetivo de esta investigación fue analizar los impactos de los techos verdes como instrumento sustentable en la adaptación climática de la CDMX, dentro del marco de la economía circular (EC) y su potencial de expansión en zonas específicas de la CDMX. Para lo cual se empleó una metodología del tipo mixta. Se implementó un techo verde ligero extensivo (TVLE) de 6 m² diseñado conforme a los principios de la EC. Los resultados muestran una reducción del 94.98 % en la huella de carbono (HC) respecto a un techo verde convencional (TVC), además de un costo 25.89 % menor y un período de recuperación de 1.5 años. Se redujo la temperatura superficial hasta 3.5 °C, en términos energéticos y considerando el uso de aire acondicionado se estimó un ahorro anual promedio de 432.95kWh/m². Se elaboró un inventario de techos verdes de la CDMX, con una captura estimada 0.077 tonCO₂/año. Se identificaron tres zonas prioritarias para instalación de 423,451 m² TVLE en la CDMX, esto evitaría el consumo de más de 2.8 millones de kWh/año, y generaría un ahorro de 8 millones de pesos anuales. Los techos verdes en la CDMX son percibidos como generadores de oxígeno y de sensaciones de calma. Se distinguen, siete obstáculos para la implementación de techos verdes en la CDMX, entre los cuales están la falta de concienciación ciudadana y políticas. Los TVLE son una alternativa sustentable y escalable para adaptar la CDMX a los efectos del cambio climático. Su integración en un enfoque de EC permitiría optimizar el uso de materiales reusados y reciclados, reduciendo impactos ambientales. Se debe considerar el TVLE dentro de un marco amplio de SbN en la implementación de políticas públicas integrales, incentivos financieros y campañas de concienciación para ampliar su adopción.

Palabras clave: Soluciones basadas en la naturaleza, techos verdes, economía circular, ciudades, políticas ambientales, adaptación al cambio climático, desarrollo sustentable.

ABSTRACT

Mexico City (CDMX) has experienced changes in land use that have led to a decrease in urban green spaces (UGS). Green roofs are a nature-based solution (NbS) used in cities for climate change adaptation, recovering UGS, and restore their ecosystem services (ES). The objective of this research was to analyze the impacts of green roofs as a sustainable tool for climate adaptation in CDMX, within the circular economy (CE) framework, and their potential for expansion in specific areas of CDMX. A mixed-methods approach was used. A 6 m² extensive lightweight green roof (LGR) designed according to CE principles was implemented. The results show a 94.98% reduction in the carbon footprint (CF) compared to a conventional green roof (CGR), as well as a 25.89% lower cost and a payback period of 1.5 years. The surface temperature was reduced by up to 3.5°C; regarding energy and considering the use of air conditioning, it was estimated an average annual savings of 432.95 kWh/m². An green roofs database in CDMX was compiled, with an estimated capture of 0.077 tons of CO₂/year. Three priority areas were identified for the installation of 423,451 m² of green roofs in CDMX. This would prevent the consumption of more than 2.8 million kWh/year and generate annual savings of 8 million pesos. Green roofs in CDMX are perceived as generators of oxygen and calm feelings. Seven obstacles to the implementation of green roofs in CDMX were identified, including a lack of public awareness and policies. Green roofs are a sustainable and scalable alternative for adapting CDMX to the climate change effects. Integrating it into a sustainable development approach would optimize the use of reused and recycled materials, reducing environmental impacts. The LGR should be considered within a broader NbS framework in the public policies implementation, financial incentives, and awareness campaigns to broaden its adoption.

Keywords: Nature-based solutions, green roofs, circular economy, cities, environmental policies, climate change adaptation, sustainable development.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los principales retos medioambientales y sociales de nuestra era. Sus repercusiones como el incremento de las temperaturas, las olas de calor y los cambios en los patrones de lluvia, no conocen límites y afectan a las áreas urbanas, donde la densidad poblacional y la superficies impermeables agravan fenómenos como las islas de calor urbana (ICU) (Chapman et al., 2019; Litardo et al., 2020; UN Habitat, 2016). En este marco, las soluciones basadas en la naturaleza (SbN), como los techos verdes, constituyen una estrategia para reducir los efectos del cambio climático y fomentar ciudades resilientes (Albert et al., 2021; Kalantari et al., 2023).

El objetivo de esta investigación doctoral es analizar los impactos del techo verde ligero extensivo (TVLE) como una herramienta sustentable que incorpora en su diseño estructural materiales reusados y reciclados, con el fin de mejorar su desempeño ambiental y disminuir su huella de carbono. Asimismo, se estimarán las zonas y sitios potenciales a colocar TVLE en la Ciudad de México (CDMX).

El primer capítulo, aborda el cambio climático y sus efectos en las ciudades, definiendo y explorando las dimensiones de la sustentabilidad urbana, la Infraestructura Verde Urbana (IVU) como un sistema integrado y planeado de elementos tanto naturales como semi-naturales que buscan proveer de Servicios Ecosistémicos (SE) y su empleabilidad para la adaptación al cambio climático en contextos urbanos. En el segundo capítulo, se expone la adopción internacional de los techos verdes como solución basada en la naturaleza (SbN), se describen las políticas y estrategias implementadas en diferentes ciudades del mundo, así como los desafíos y limitaciones encontrados en su aplicación.

En el tercer capítulo se presenta el caso de estudio, la CDMX, las estrategias sustentables que han sido adoptadas para enfrentar el cambio climático. Así como los antecedentes de las áreas verdes urbanas (AVU) en la CDMX y la adopción de techos verdes. También se presenta el techo verde ligero extensivo (TVLE) como una alternativa al techo verde convencional (TVC).

En el cuarto capítulo, se describen las generalidades metodológicas utilizadas para la investigación. Se detallan los pasos para la creación de un inventario de techos verdes en la CDMX, incluyendo la recopilación de datos y la geolocalización de los edificios con techos verdes existentes. Además, se incluyen las metodologías para analizar el impacto social, económico y ambiental de los techos verdes, con enfoque en el TVLE y por su posible expansión en la CDMX. Este capítulo incluye también la metodología para realizar el análisis de costo-beneficio (ACB) y costo-oportunidad (ACO), así como un análisis de ciclo de vida (ACV) para evaluar el impacto ambiental.

El quinto capítulo, presenta un análisis de los resultados obtenidos a lo largo de la investigación. Se discute la viabilidad del TVLE como alternativa al TVC y se analizan los datos del inventario de techos verdes de la CDMX. Se evalúan los impactos sociales, económicos y ambientales de los techos verdes, ofreciendo una proyección del impacto futuro de su expansión en la ciudad. Finalmente se presenta la discusión sobre las implicaciones de los hallazgos y recomendaciones para futuras políticas.

Finalmente se presentan las conclusiones en donde se describe y confirma el impacto del TVLE como una herramienta sustentable con impactos positivos para adaptar la CDMX al cambio climático, así como debe ser empleado dentro de un marco amplio de SbN, con la normatividad correspondiente para respaldar y fomentar su adopción.

Justificación

La CDMX enfrenta una deficiencia de cantidad de AVU y una sobreocupación del suelo, lo que ha derivado en la pérdida de SE y en la alteración de la calidad del aire, del clima y de la disponibilidad de recursos hídricos. Una de las SbN propuestas para recuperar espacios naturales en zonas urbanas es el diseño e implementación de techos verdes. Estos sistemas han sido utilizados en todo el mundo y se introdujeron oficialmente a la CDMX en 2007. Sin embargo, desde entonces, su aplicación ha sido limitada y no se han consolidado políticas ni estrategias suficientes para fomentar su adopción a gran escala.

Esta investigación busca demostrar, desde una perspectiva de EC y de sustentabilidad, el potencial de expandir los techos verdes en la CDMX. Para ello se propone el uso de TVLE como un sistema con menor HC que integra materiales orgánicos residuales (MOR) en su capa drenante, Con ello se promueve se promueve la reutilización de recursos locales, se evita la disposición final de residuos en tiraderos y se fortalece el ciclo de aprovechamiento de materiales dentro del marco de la EC. De esta manera, el TVLE no solo contribuye a la IVU, sino que también genera beneficios ambientales, económicos y sociales alineados con una transición hacia ciudades sustentables.

Pregunta de investigación

¿De qué manera la implementación y expansión de los TVLE contribuye a la adaptación de la CDMX frente al cambio climático, y cuáles serían sus implicaciones ambientales, sociales y económicas?

Hipótesis

La implementación y expansión de TVLE como solución sustentable genera impactos positivos en las dimensiones ambiental, social y económica, lo que contribuye a la adaptación de la CDMX frente al cambio climático.

Objetivo general

Analizar los impactos ambientales, sociales y económicos derivados de la implementación de techos verdes y evaluar su potencial expansión en zonas específicas de la CDMX, con el fin de estimar su contribución a la adaptación al cambio climático.

Objetivos específicos

1. Revisar la literatura sobre los beneficios, políticas, estrategias y limitaciones en la adopción de los techos verdes a nivel local e internacional como medida de adaptación al cambio climático.
2. Diseñar, implementar y monitorear un TVLE bajo criterios de EC para evaluar su rendimiento térmico, su HC y su rentabilidad a través de un análisis costo-beneficio (ACB) como alternativa al TVC.
3. Elaborar un inventario georreferenciado de techos verdes en la CDMX, para estimar la calidad de la vegetación con el índice MSAVI y la captación de dióxido de carbono (CO₂).
4. Seleccionar techos verdes representativos con el fin de comparar la calidad de la vegetación mediante índices espectrales (MSAVI y VARI) y analizar su percepción y uso social.
5. Determinar zonas y sitios prioritarios de la CDMX para la instalación de techos verdes mediante indicadores ambientales y sociales en un análisis multicriterio con Sistemas de Información Geográfica (SIG).
6. Proponer recomendaciones estratégicas basadas en los indicadores sustentables identificados en la investigación para fomentar la adopción y expansión de los techos verdes como una SbN para la adaptación al cambio climático en la CDMX.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Adaptación al cambio climático en las ciudades

Las ciudades enfrentan desafíos económicos, sociales y ambientales, ya que los recursos disponibles se utilizan para apoyar a quienes viven o trabajan en ellas, lo que provoca déficits energéticos, escasez de agua, degradación de los recursos naturales, la pérdida de biodiversidad, la alteración a los sistemas hidrológicos, los procesos biogeoquímicos y las condiciones climáticas (Campbell-Lendrum & Corvalán, 2007; Grimm et al., 2008). Estos problemas impactan directamente en la calidad de vida y el bienestar de los habitantes (Wu et al., 2018).

Entre las principales preocupaciones ambientales se encuentra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Los principales GEI son el CO₂, el metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozono (O₃), los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF₆) (Gautam et al., 2021; Janssens-Maenhout et al., 2019; Ou et al., 2021).

La acumulación de GEI provoca impactos negativos en los ecosistemas y en la salud humana, asociados a fenómenos meteorológicos extremos, el aumento del nivel del mar, al calentamiento global y la ICU (Filonchik et al., 2024; Gautam et al., 2021; Shakoor et al., 2020). La ICU es el aumento local de la temperatura en áreas urbanas densamente edificadas en comparación con sus alrededores rurales, lo que intensifica las olas de calor y amplifica sus efectos sobre la salud, la energía y el medio ambiente (Leal Filho et al., 2023; McCarthy et al., 2010).

En 2015, se implementó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que describen problemas globales y objetivos a alcanzar. Uno de ellos es el "ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles", que reconoce la necesidad de adaptar las áreas urbanas, dado que se proyecta un continuo crecimiento de la población en estas zonas; emitiendo GEI, requiriendo espacio y desplazando áreas naturales a nivel del suelo (Naciones Unidas, 2018; World Health Organisation, 2016).

En este sentido, los actores y las ciudades son vitales en el establecimiento y definición de políticas contra el cambio climático y en el fomento de un desarrollo

sustentable. Para abordar estos retos, se necesitan no solo iniciativas locales, sino también acuerdos mundiales que guíen las políticas y tácticas a largo plazo. Con base en lo anterior, el Acuerdo de París, que fue adoptado en la COP21, fija objetivos climáticos que afectan directamente el futuro de las áreas urbanas.

Este acuerdo establece la meta de equilibrar las fuentes de emisión de GEI con los sumideros de absorción entre los años 2050 y 2100. Para ello, se busca mantener el incremento global de temperatura por debajo de los 2°C, con tratamientos para limitarlo a 1.5°C. Asimismo, se pretende disminuir la cantidad de emisiones de GEI hasta un nivel que pueda ser absorbido de manera natural en la segunda mitad de este siglo.

Estos acuerdos internacionales manifiestan la necesidad de salvaguardar los ecosistemas, terrestres y marinos, ante los impactos del cambio climático (Barrett & Stavins, 2003; Gupta, 2010). La pérdida ambiental y el incremento de sucesos extremos amenazan la biodiversidad y el equilibrio natural de diversos ecosistemas (Pizer, 2006).

Además de estos impactos, el cambio climático también representa una amenaza directa para la salud humana con un incremento de la mortalidad y de enfermedades, con más de 150,000 muertes al año asociadas a sus consecuencias, y se anticipa un aumento notable entre 2030 y 2050 por motivos como malnutrición, malaria, diarrea y estrés por calor (Patz et al., 2005; Rocque et al., 2021). De igual manera, las altas temperaturas, la contaminación del aire y los fenómenos climáticos extremos aumentan la probabilidad de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, tales como infartos, accidentes cerebrovasculares, asma y alergias (Franchini & Mannucci, 2015; Khraishah et al., 2022).

La importancia de adaptar las ciudades al cambio climático radica en la vulnerabilidad de las poblaciones urbanas a los impactos como eventos climáticos extremos y enfermedades infecciosas. Esto se debe a la concentración de personas

e infraestructuras necesarias para las actividades en los procesos económicos, políticos y sociales (Araos et al., 2016; Birkmann et al., 2010). Por lo tanto, se requiere implementar estrategias de adaptación que protejan y mejoren la resiliencia de estas áreas urbanas. Además, las acciones estratégicas de adaptación climática en las ciudades pueden mejorar la equidad y el desarrollo inclusivo si se alinean con los ODS (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2018), abordando al mismo tiempo los intereses políticos y económicos (Chu et al., 2017). Esto implica integrar prioridades de adaptación en los planes urbanos y los arreglos de gobernanza, considerando las implicaciones socioeconómicas.

La adaptación al cambio climático se define como el proceso en el que los sistemas naturales o humanos son ajustados en respuesta a la variabilidad climática presente o futura. Estos ajustes tienen como objetivo reducir los daños potenciales o aprovechar las oportunidades que pueden derivarse de esos cambios (OECD, 2015). De acuerdo con esta definición, la adaptación ha sido un componente fundamental tanto de la evolución de los ecosistemas como del progreso de las sociedades humanas, manifestándose en modificaciones de procesos, prácticas y estructuras para afrontar los impactos del clima (Noble et al., 2018).

La adaptación climática también consiste en mitigar los efectos adversos del clima en la salud, el bienestar y las acciones humanas, mientras se maximizan las oportunidades que puede presentar (Smith et al., 2000). Esta adaptación puede ser reactiva, anticipatoria o pasiva y se manifiesta en acciones que refuerzan la resiliencia de los sistemas ecológicos, sociales o económicos frente a los riesgos climáticos. La efectividad de estas medidas depende de las particularidades del sistema impactado, sobre todo de su susceptibilidad ante las condiciones climáticas (Burton et al., 2001).

Los gobiernos y las instituciones públicas locales desempeñan un papel crucial en la adaptación al cambio climático (Oberlack, 2017), ya que transforman los límites y las estructuras administrativas convencionales de la planificación urbana (Tompkins & Eakin, 2012). En este contexto, deben enfrentar problemas de coordinación entre

el sector público y el privado, dificultades de gobernanza y financiación, así como la necesidad de ajustar su estructura para aumentar la resiliencia frente a los impactos del cambio climático.

En los países en desarrollo, las ciudades enfrentan desafíos adicionales en la adaptación al cambio climático debido a problemas de infraestructura y pobreza. No obstante, enfoques transformadores pueden ayudar a invertir en infraestructuras resilientes al clima y de bajas emisiones de carbono, abordando simultáneamente problemas de pobreza y exposición a riesgos climáticos, como inundaciones y olas de calor (Filho et al., 2019).

Para adaptar y mitigar los diversos efectos del cambio climático, es necesario establecer políticas públicas (Short, 2010) con factores críticos que incluyan transporte, uso de energía, emisiones de gases de efecto invernadero, agua y salud (Wu et al., 2018). Aquí es donde emerge la IVU como una herramienta en las políticas públicas urbanas, transformando el paisaje de uno centrado en edificios a uno natural y colorido (Kumar et al., 2019). Esto incluye jardines comunitarios, huertos, parques urbanos y bosques, sistemas de drenaje sustentable (SUDS), corredores, paredes y techos verdes, todos los cuales proporcionan beneficios socioeconómicos y ambientales, fortaleciendo la resiliencia de las ciudades ante eventos climáticos extremos como inundaciones y olas de calor (Kovats & Akhtar, 2008).

La IVU ayuda a reducir la temperatura superficial y la escorrentía al modificar los intercambios de energía y la hidrología. Este enfoque no solo disminuye los efectos del cambio climático, sino que también mejora la calidad de vida al crear espacios naturales en las ciudades (Gill et al., 2007). La IVU incluye parques, techos verdes y sistemas de gestión de aguas pluviales que pueden reducir el efecto de ICU y gestionar el agua de manera más eficiente.

Un enfoque holístico para el desarrollo de ciudades resilientes depende de la integración de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), soluciones tecnológicas y sociales que puedan mejorar la habitabilidad urbana y la resiliencia frente a los impactos del cambio climático. Estas medidas de adaptación, que abarcan diversos enfoques, pueden abordar problemas socio ecológicos y aumentar la capacidad de respuesta ante futuros impactos climáticos (Lin et al., 2021).

Alineado con el ODS 11, dentro de estas ciudades, las AVU, como parques o bosques urbanos, son parte de su IVU, que incluye estanques de agua pluvial, jardines de lluvia, muros y techos verdes. Todos ellos proporcionan SE, como la regulación del clima, hábitats para la biodiversidad y la reducción de la contaminación del agua y el aire (Millennium Ecosystem Assessment, 2003; Norton et al., 2015; Taguchi et al., 2020). La IVU proporciona SE esenciales, fomentando un ambiente urbano saludable para la vida silvestre y los seres humanos y contribuyendo a beneficios sociales y económicos (Tzoulas et al., 2007). Es por eso que se valoran como lugares seguros donde los ciudadanos pueden socializar, potencialmente fortalecer los lazos comunitarios y participar en actividades de relajación que pueden mejorar la salud mental y física (Chiesura, 2004).

Por lo tanto, las AVU contribuyen a la mejora de la sociedad, ya sea pública o privada. Este impacto se alinea con la necesidad de preservar el medio ambiente natural dentro de las ciudades, enfatizando la importancia del desarrollo urbano sustentable en la planificación urbana (Berg et al., 2010). Para abordar los desafíos ambientales actuales, las SbN, arraigadas en los procesos de biodiversidad, han ganado popularidad como una forma de AVU (Bowler et al., 2010; Maas et al., 2006) y entre ellos también se consideran los techos verdes.

1.2 Definición y dimensiones de la sustentabilidad en las ciudades

La idea de sustentabilidad en el ámbito urbano está influenciada por diversas disciplinas y enfoques mixtos como la economía ecológica, la ecología política, la historia ambiental, la sociología ambiental, la ecología humana, la agroecología y la psicología ambiental, entre otros (Dempsey et al., 2011). El desarrollo sustentable tiene una naturaleza multidimensional por lo que es objeto de discusiones sobre su definición, su carácter normativo, y su representación considerando un paradigma total o solo un esquema para las políticas públicas (Boulangier & Bréchet, 2005).

El desarrollo sostenible, según el Informe Brundtland, es aquel que “satisface las necesidades actuales sin poner en riesgo la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas”, esto incluye límites que no son fijos, que varían según los recursos naturales, el avance tecnológico y la estructura social, además de la capacidad de la biósfera para asimilar los efectos de las acciones humanas (World Commission on Environment and Development (WCED), 1987).

El crecimiento continuo, inclusivo y equitativo, se enfoca en disminuir desigualdades, mejorar la calidad de vida, promover un desarrollo social justo, e integrar la gestión sostenida de los recursos y los ecosistemas, asegurando además su restauración y capacidad de recuperación ante nuevos desafíos (Pareja-Eastaway, 2012). Sin embargo, la noción de desarrollo sustentable, adoptada principalmente en América Latina, amplía esta perspectiva al incorporar la dimensión cultural, ética y comunitaria, reconociendo que la sustentabilidad implica también los valores, saberes locales y formas de vida que permiten la permanencia de las sociedades y sus ecosistemas en el tiempo (Abeysekera, 2024; Adade Williams et al., 2020; Fritz & Silva, 2018; Mazzocchi, 2020).

Mientras que el término sostenible (de origen europeo y anglosajón) enfatiza la viabilidad a largo plazo de los sistemas económicos y ecológicos, el término sustentable (de uso latinoamericano) subraya la interdependencia entre lo ambiental, lo social, lo económico y lo cultural, considerando que sin una base

cultural sólida no puede haber equilibrio ambiental ni justicia social (Álvarez-Véliz & Barton, 2024; Horlings, 2015; Magni, 2017; Sandoval-Rivera, 2020; Zarta Ávila, 2018).

Desde esta perspectiva, la presente investigación se adscribe al enfoque de desarrollo sustentable, al reconocer la importancia de los contextos locales, las prácticas sociales y la cultura urbana en la búsqueda de soluciones ambientales integrales, como el TVLE, que combina beneficios ecológicos, sociales y económicos dentro de una visión circular del desarrollo.

En este sentido, el desarrollo sustentable demanda la ejecución de políticas públicas intersectoriales que abarquen aspectos económicos, sociales, ambientales, culturales, educativos y de salud, entre otros (Brodhag & Taliere, 2006). Sin embargo, la conexión entre los conceptos se respalda en la conservación del medio ambiente y el aumento económico. La fusión de los dos conceptos, según varios autores, puede atenuar o regular esta aparente contradicción. En este contexto, se subraya que el “capital natural” no puede ser reemplazado en su totalidad por capital producido, lo que vuelve necesaria su preservación, además de la modificación del sistema de valores vigente para otorgar mayor importancia a la salud de los ecosistemas (Asghar et al., 2024).

El concepto de sustentabilidad es multidimensional formado por fundamentos económicos, ambientales y sociales (Beg et al., 2002; Jabareen, 2008). La esfera económica se enfoca en la utilización eficiente de los recursos para lograr un crecimiento económico sustentable a largo plazo sin afectar el medio ambiente ni la cohesión social (Babacan et al., 2023). La dimensión ambiental se concentra en la preservación de los recursos naturales y el bienestar de los ecosistemas, intentando reducir su degradación para asegurar su disponibilidad futura (Hristov et al., 2021; Strezov et al., 2017).

La dimensión social incluye elementos como la equidad, el bienestar de las personas y el crecimiento de las comunidades, fomentando la inclusión y la justicia social (Kaivo-oja et al., 2014; Murphy, 2012). Desde la óptica de la ecología política,

todos los actores que forman parte del gobierno, las corporaciones, los organismos internacionales y las organizaciones no gubernamentales cumplen funciones desiguales. Algunos diseñan e implementan políticas públicas, otros contribuyen a los problemas ambientales, mientras que ciertos sectores enfrentan sus consecuencias (Meyar-Naimi & Vaez-Zadeh, 2012; Ulewicz & Blaskova, 2018).

En el contexto urbano, la sustentabilidad significa crear ciudades que fomenten el bienestar de sus ciudadanos mientras minimizan su impacto ambiental (McGranahan & Satterthwaite, 2002). Las ciudades sustentables se distinguen por su eficiencia energética, el fomento de energías renovables, la disminución del consumo y la incorporación de infraestructura ecológica (Bhattacharya et al., 2020; Chang et al., 2018). Asimismo, necesitan promover la diversidad económica y social, reforzando la cohesión comunitaria y la participación ciudadana (Futcher et al., 2017; Macke et al., 2019; Riffat et al., 2016).

La planificación urbana sustentable implica manejar de manera integral los residuos, mejorar el transporte público, garantizar un acceso equitativo a áreas verdes y preservar la biodiversidad (Mersal, 2016; Puchol-Salort et al., 2021). Para conseguirlo, las ciudades deben alcanzar un equilibrio entre el desarrollo económico y la conservación ambiental, abordando retos como la contaminación, la falta de recursos y las consecuencias del cambio climático (Yan et al., 2018). Las iniciativas efectivas de sustentabilidad urbana a menudo se basan en estructuras de gobernanza multinivel que fomentan la acción local y la implementación eficiente de políticas públicas (Kutty et al., 2020; Panteleeva & Borozdina, 2021).

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1 Techos verdes como estrategia de adaptación al cambio climático

Las SbN han surgido como estrategias para abordar los desafíos de resiliencia urbana, particularmente en el contexto de la adaptación al cambio climático. En las áreas urbanas, donde la concentración de población e infraestructura exacerba las presiones ambientales, las SbN guían hacia un camino resiliente para ofrecer beneficios multifacéticos. Aunque las SbN pueden ser diversas, el objetivo en la aplicación de todas ellas es formar parte de los sistemas urbanos mejorando la resiliencia y la sustentabilidad urbanas.

Los techos verdes han surgido en algunos países, como medidas de compensación ecológica en áreas de asentamiento y se ven como una técnica para adaptarse al cambio climático y reducir sus efectos en las ciudades. En Suiza obligan su implementación a través de regulaciones de construcción (Brenneisen, 2004).

Esta integración tiene como objetivo abordar los problemas ambientales para el desarrollo urbano aprovechando el espacio urbano no utilizado para promover la biodiversidad y mejorar la calidad de vida urbana en general.

Desde la década de los 70s, después de la aparición de lo que conocemos actualmente como la tecnología de los techos verdes (Jim, 2017a, 2017b) y al observar su utilidad de resolver ciertas necesidades de los ciudadanos y promover la sustentabilidad en la infraestructura urbana, se han recomendado en las ciudades alrededor del mundo como un método para aumentar los espacios verdes en las áreas metropolitanas (Oberndorfer et al., 2007).

Los techos verdes convencionales (TVC) son sistemas casi naturales compuestos por diferentes vegetaciones, sustratos y otras capas funcionales y módulos de sistemas prefabricados con distribuciones de vegetación variables (Castleton et al., 2010). Hay dos tipos principales de techos verdes: intensivos y extensivos. Su

principal diferencia radica en el grosor de la estructura del techo verde, la capacidad de carga asociada a la superficie del techo, el costo de instalación y de mantenimiento requerido para mantener la vegetación (Urbano-López De Meneses, 2013).

El tipo intensivo es comparable a un jardín o parque a nivel del suelo y requiere una capa de sustrato más gruesa para soportar árboles o arbustos (Green Roofs for Healthy Cities—North America Inc., 2015). El tipo intensivo tiene una capa de sustrato lo suficientemente profunda que permite el desarrollo de plantas con raíces extensas, puede incluir pasto, arbustos y árboles. Se caracteriza por su propósito de simular un jardín, accesible para el uso de las personas, motivo por el cual tiene altos costos de mantenimiento e inversión inicial.

En contraste, el tipo extensivo tiene un grosor de sustrato más bajo para las plantas, normalmente del género *Sedum*, y requiere un mantenimiento mínimo. Se sugiere utilizar plantas nativas para promover la biodiversidad (MacIvor & Lundholm, 2011). Puede tener una estructura muy ligera, dichas condiciones lo hacen no accesible para el uso humano (Bowler et al., 2010; Castleton et al., 2010; Luckett, 2009; Mahdiyari et al., 2018; Norton et al., 2015; Oberndorfer et al., 2007).

Independientemente del tipo, la estructura de los techos verdes implica capas funcionales: impermeable, anti-raíz y membrana, que impiden que el agua y las raíces penetren en el edificio (Joshi & Teller, 2021; Oberndorfer et al., 2007). A continuación, están los sustratos que dan nutrientes a la vegetación (Nektarios et al., 2014).

Su instalación en zonas urbanas como SbN tiene beneficios económicos y sociales como el ahorro de energía por la reducción de temperaturas en los inmuebles mejorando a la vez el confort térmico, aumenta la vida útil de las membranas impermeabilizantes de los techos y reduce el ruido exterior hacia el interior de la infraestructura (Guattari et al., 2020; Lin et al., 2013; Peñalvo-López et al., 2020).

Los techos verdes son un ecosistema inducido en el paisaje urbano creado por una combinación de disciplinas como biología, ingeniería y arquitectura. Estos proveen de diversos SE que van desde valores estéticos hasta adaptación al cambio climático, incluida la purificación del aire, la provisión de hábitat y alimento para la vida silvestre, el almacenamiento de aguas pluviales y la captura de carbono(Elmqvist et al., 2013; Harada & Whitlow, 2020; Mesimäki et al., 2019; Millennium Ecosystem Assessment, 2003). En Reino Unido y Bélgica se ha estimado la retención de aproximadamente 2.5% de agua pluvial por el aumento en 10% de la construcción de techos verdes (Mentens et al., 2006; Speak et al., 2013).

Los techos verdes mejoran el rendimiento térmico en la infraestructura urbana por los mecanismos de sombreado, evapotranspiración, inercia y aislamiento térmicos (Cascone et al., 2019) . La mitigación del efecto ICU se ha comprobado en distintos contextos climáticos, con reducciones significativas de temperatura tanto en la superficie del techo como en el ambiente circundante. Su efecto se debe al incremento de la evapotranspiración, la mayor capacidad de aislamiento y la reducción de la absorción de calor en comparación con techos convencionales (Lukinov et al., 2024; Cuce et al., 2025; Li et al., 2014; Sharma et al., 2016; David, 2024; Sohaili et al., 2018).

De manera general, los techos verdes pueden disminuir la temperatura superficial entre 8 y 37°C, dependiendo del tipo de sistema y las condiciones climáticas, y reducir la temperatura del aire urbano en 1–2°C, con los mayores descensos registrados durante las horas de máxima radiación solar. En climas tropicales como Malasia, se observó una reducción promedio de 46.7°C en un techo convencional a 22.9°C en un techo verde (Rahman et al., 2022).

En el Mediterráneo, las temperaturas máximas de los techos verdes se mantuvieron por debajo de 35°C, mientras que los techos convencionales alcanzaron hasta 72.2°C (Maiolo et al., 2020). En Polonia, el techo verde registró 27°C, frente a 52.6°C en un techo convencional (Baryła et al., 2019). De forma similar, en Australia

se observaron reducciones de hasta 20°C en condiciones de calor extremo (Fleck et al., 2022). En invierno, los techos verdes pueden elevar ligeramente la temperatura superficial del techo entre 6 y 8°C, gracias a su capacidad de aislamiento térmico (J. C. DeNardo et al., 2005; Juras, 2022)

Asimismo, fomentan la disminución de la contaminación atmosférica ya que la vegetación del techo verde puede secuestrar entre 0.313 a 1.89 kg CO₂/m²*año y 0.28 a 9.82 kg C/m²*año (Getter et al., 2009; Kuronuma et al., 2018; Shafique et al., 2020; Yang et al., 2008). Estas variaciones dependen del tipo de vegetación empleada, la profundidad y composición del sustrato, las condiciones climáticas locales, así como del mantenimiento del sistema (Seyedabadi et al., 2022).

Algunos de los factores son el tipo de vegetación empleada y sus características fisiológicas. Las especies con altas tasas fotosintéticas y mayor producción de biomasa, como algunos pastos o especies tolerantes a la sequía y al frío tienen una mayor capacidad de captura de CO₂ (Collazo-Ortega et al., 2017; Getter & Rowe, 2009; Luo et al., 2015; Seyedabadi et al., 2024). En climas áridos, las especies con metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM, por sus siglas en inglés), como Sedum, resultan más eficientes por su menor demanda hídrica, mientras que los pastos pueden superar su desempeño en condiciones óptimas de humedad (Getter et al., 2009; Seyedabadi et al., 2021).

Asimismo, la profundidad y composición del sustrato inciden en la retención de carbono: los sustratos más profundos y ricos en materia orgánica promueven un mayor crecimiento vegetal y una mayor acumulación de carbono, especialmente cuando incluyen enmiendas como biochar o lodos residuales tratados (Halim et al., 2022; Nasr et al., 2024).

Las condiciones ambientales también son determinantes. La intensidad lumínica, la temperatura así como la disponibilidad de agua regulan la fotosíntesis y el secuestro de CO₂. En consecuencia, los techos verdes ubicados en climas templados suelen

mostrar tasas de captura superiores a los instalados en regiones frías o áridas (Konopka et al., 2021; Pique et al., 2023).

Finalmente, el mantenimiento regular como el riego y la poda, favorece la salud vegetal y maximiza la fijación de carbono, aunque estas mismas actividades pueden generar emisiones asociadas, lo que afecta el balance neto del sistema. Además, el diseño y la vida útil del techo verde, también inciden en los beneficios netos de carbono a lo largo del ciclo de vida (Kuronuma et al., 2018; Pique et al., 2023; Wan Ismail et al., 2019).

El techo verde del tipo extensivo y en algunos casos los del tipo intensivo, son espacios libres de actividades humanas recurrentes por lo que fomenta el desarrollo de flora y fauna, pero también como un espacio para desarrollar otro tipo de SbN como lo son los huertos urbanos (Fernandez-Canero & Gonzalez-Redondo, 2010; Harada & Whitlow, 2020; Lundholm, 2015; Wang et al., 2017).

Respecto al impacto a la salud, la interacción con la naturaleza tiene beneficios significativos para aquellas personas con afecciones médicas (Berman & Krpan, 2011). Debido al impacto económico y ambiental por estos beneficios, la sociedad ha recibido positivamente a los techos verdes (Everett & Lamond, 2019; Tsantopoulos et al., 2018).

La contribución del techo verde como un espacio natural inducido en los inmuebles de las ciudades aporta un entorno estéticamente más agradable a la sociedad en relación con la predominante infraestructura urbana gris (Tsantopoulos et al., 2018). En techos verdes intensivos en Finlandia, Helsinki, se reportan experiencias restaurativas y recreativas, así como la generación de sentimientos positivos tales como felicidad, simpatía, entusiasmo, esperanza, y confort, cualidades estéticas multisensoriales, entre otros, (Mesimäki et al., 2017, 2019). Cabe mencionar que aún si el techo verde no es accesible y solo funciona como un elemento más del

paisaje tiene repercusiones positivas en aquellas personas que lo observan (Dravigne et al., 2008; Lee et al., 2014; Loder, 2014).

La reducción de espacios abiertos para el desarrollo de la biodiversidad y con ello sus servicios ecosistémicos ha disminuido la capacidad de la naturaleza de aportar a la calidad de vida, aunque la tecnología ha compensado ciertos efectos, la naturaleza por sus propiedades no puede ser reemplazada. Es por lo que se deben aprovechar los espacios sin uso como lo son los techos, para que la sociedad tenga un conocimiento más profundo y los acepte como una forma de obtener beneficios.

El impacto de los techos verdes a escala ha sido posible empleando los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con los cuales se calcula la eficiencia por el ahorro energético de techos verdes que podrían ser instalados en una zona urbana, esta metodología también puede ser aplicada para pronosticar la mejoría en la mitigación del efecto isla de calor, el incremento de la biodiversidad, además de contabilizar la disminución de contaminación atmosférica y acústica (Luo et al., 2011).

Por medio de simulaciones digitales se ha calculado el potencial de captación de carbono y capacidad de retención de agua de lluvia, donde el techo verde de tipo extensivo resultó con una mayor eficacia energética considerando su expansión en el territorio (Karteris et al., 2016).

2.2 Visión internacional para la adopción de techos verdes

En este apartado se presentan experiencias internacionales de la adopción de techos verdes, por medio de la generación e implementación de políticas de techos verdes, la cual requiere gobernanza y tiempo para ser desarrolladas por diversos interesados interrelacionados.

La legislación del entorno urbano puede mejorar la participación pública si se centra en la tecnología y la justicia, entre otros aspectos, en la sociedad (Raju et al., 2018). Las políticas públicas facilitan la implementación de las SbN dentro de los marcos de planificación urbana sustentable, lo que las integra cada vez más en los debates sobre conservación de la biodiversidad, adaptación al cambio climático y gestión sustentable de los recursos naturales (Kronenberg, 2016).

Los gobiernos de todo el mundo han reconocido el potencial de las SbN para abordar los desafíos del cambio climático y la biodiversidad (Kooijman et al., 2021); la gobernanza policéntrica y los incentivos financieros son facilitadores clave para respaldar la implementación efectiva de las SbN (Martin et al., 2021). La Unión Europea respaldó esta visión y destacó especialmente la importancia de las NbS para fomentar una economía más verde y competitiva (Faivre et al., 2017).

En los contextos urbanos, las SbN han ganado atención como una herramienta rentable en la planificación con un enfoque basado en el rendimiento que aborda diversos desafíos socioambientales (Bush & Doyon, 2019; Dorst et al., 2019; Kumar et al., 2020). Su adopción requiere colaboración interdisciplinaria y marcos políticos integrados (Zhu et al., 2023). Integrar las SbN en la planificación urbana requiere considerar los desafíos de gobernanza, la justicia socioambiental y la cohesión social (Babí Almenar et al., 2021). Un proceso de planificación integrador y basado en el conocimiento es necesario para potencializar las SbN en ciudades verdes (Brokking et al., 2021). Estos procesos deben considerar los desafíos de

gobernanza, la justicia socioambiental y la cohesión social (Frantzeskaki, 2019; Kabisch et al., 2016).

Integrar las SbN en los marcos de planificación urbana sienta las bases para crear ciudades resilientes, sustentables y habitables con políticas ambiciosas que utilicen eficazmente los terrenos edificables (Næss, 2001). Algunas pautas para garantizar que las SbN provean beneficios sustentables a gran escala son (Seddon et al., 2021):

- No deben considerarse como un sustituto del alejamiento de los combustibles fósiles, sino un complemento dentro de estrategias integrales de mitigación y adaptación al cambio climático.
- Las SbN abarcan una amplia variedad de ecosistemas terrestres y marinos, no limitándose únicamente a los bosques.
- Requieren el compromiso y la aprobación plena de los pueblos indígenas y las comunidades locales.
- Deben diseñarse intencionadamente para generar beneficios cuantificables tanto para la biodiversidad como para las personas, asegurando resultados verificables en el tiempo.

2.2.1 Políticas y estrategias

Las políticas que promueven los techos verdes se desarrollan en áreas urbanas densamente pobladas con desafíos ambientales o aspiraciones de infraestructura resiliente y visualmente atractiva (Dong et al., 2020). En términos económicos, el mercado global de techos verdes se evaluó en 2,1 mil millones de dólares en 2023 y se espera que crezca un 13,3% en los próximos ocho años. Europa es un referente global liderando en esta tendencia (IMARC Group, 2023).

Las políticas públicas orientadas a los techos verdes incluyen regulaciones directas, medidas indirectas, incentivos financieros y fondos para investigación (Carter & Fowler, 2008). Estas estrategias buscan enfrentar desafíos ambientales urbanos como la falta de espacios verdes urbanos, el efecto de ICU y las superficies

impermeables (Carter & Fowler, 2008; Green Roofs for Healthy Cities, 2023; Liberalesso et al., 2020). Asimismo, las campañas de concientización y los incentivos económicos son fundamentales para superar la resistencia inicial a su adopción (Green Roofs for Healthy Cities, 2023).

El análisis comparativo incluyó diez países: Argentina (ARG) Brasil (BRA), Chile (CHIL), Colombia (COL), México (MEX), Estados Unidos de América (EUA), China (CHI), España (ESP), Portugal (POR) y Canadá (CAN), on el fin de comprender cómo los contextos socioeconómicos y ambientales influyen en la regulación y promoción de techos verdes.. En total se encontraron 67 normativas y regulaciones para promover techos verdes que fueron clasificadas en leyes locales, ordenanzas, planes y estándares tanto nacionales como locales.

Canadá tiene diversos estándares a nivel local, con liderazgo de las provincias y ciudades en la adopción de techos verdes. Portugal, en cambio, presenta un equilibrio entre políticas nacionales y locales, lo que sugiere una coordinación entre distintos niveles de gobierno. En general, los países con marcos normativos robustos logran una implementación más amplia y eficiente de proyectos sustentables (Govind & Alam, 2023; Nika et al., 2020). Esto se traduce en beneficios tangibles como la reducción del ICU, mayor eficiencia energética y aumento de biodiversidad urbana (Aboelata, 2021).

Chile cuenta con uno de los marcos normativos más completos, que incluye la Ley Marco de Cambio Climático (Ley N°21.455 de 2022) (Normativa Asociada, 2022) , y la Norma Chilena 3626:2020, la cual establece los requisitos técnicos y clasificaciones de techos verdes (Ministerio de Vivienda y Urbanismo Chile, 2020). Este enfoque demuestra un compromiso integral, que combina legislación y regulación técnica.

Canadá y EUA aplican modelos descentralizados. En Canadá, con la Bi-ley No. 583-2009 de Toronto se considera pionera, al establecer metas obligatorias para nuevos desarrollos urbanos (City of Toronto, 2021). En EUA, la Ley de Movilización

Climática de Nueva York y las políticas locales de ciudades como Chicago promueven infraestructuras sostenibles a nivel estatal y municipal (New York City Mayor's Office of Climate and Sustainability, 2021).

Portugal tiene la Ley de Sostenibilidad Energética de Edificaciones que promueve el uso de techos verdes, (Finanças e Ambiente e Ação Climática et al., 2024) y marcos locales, como la Ordenanza Verde de Lisboa (Presidência do Conselho de Ministros, 2020), que articulan acciones nacionales y locales en torno a las SbN.

En contraste, México no cuenta con una ley o norma federal específica sobre techos verdes. Aunque existen esfuerzos locales, como la NADF-013-RNAT-2007 de la CDMX, la ausencia de una política nacional limita la expansión de estas prácticas y restringe los beneficios que podrían derivarse de su adopción.

Tabla 1. Comparación de leyes y ordenanzas

País	Leyes	Ordenanzas
ARG	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ley 4428 2012 (Buenos Aires) 	-
BRA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ley Municipal 18.112/2015 (Recife) 	-
CHIL	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ley Marco de Cambio Climático (Ley de 2022) ▪ Ley de Ordenación y Fomento Construcción Sustentable (Valparaíso) ▪ Ley de Incentivos Urbanos Sostenibilidad (Santiago) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones ▪ Norma Chilena 3626:2020
COL	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proyecto de Ley 207/2021C (Ministerio de Vivienda Colombia, 2021) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Acuerdo No 418 (El Concejo de Bogotá, 2009)
MEX	-	-
EUA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ley Política Ambiental Nacional (NEPA) (1970) ▪ Ley de Movilización Climática de Nueva York (2019) ▪ Proyecto de ley HR7693 del 116.º Congreso 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ordenanza sobre edificios ecológicos 2008 (Denver) ▪ Ordenanza Techos verdes (Chicago) ▪ Mandato Techos verdes (San Francisco)
CHI	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ordenanza de ecologización de Shanghai - mandatoria en edificios públicos
ESP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ley 5/2014 de la Generalitat Valenciana, de la Generalitat sobre el Territorio y Urbanismo ▪ Ley 2/2014 de Economía Sostenible en Cataluña 	-
POR	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ley de Sostenibilidad Energética de Edificaciones (2013) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ordenanza Verde de Lisboa (2019)
CAN	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bi-ley de la Ciudad de Toronto No. 583-2009 	-

2.2.2 Planes nacionales y locales

En cuanto a los planes nacionales, Portugal y España muestran enfoques consolidados. Portugal cuenta con el Plan Nacional de Acción para la Energía Sostenible (2006) y la Estrategia Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2010), los cuales establecen una base para la promoción de medidas de eficiencia energética y resiliencia climática (Agencia Portuguesa do Ambiente, 2012). España, por su parte, promueve la Estrategia Nacional de Infraestructura Verde y de la Conectividad y Restauración Ecológicas (2021) que integra los techos verdes en un marco amplio de SbN (Ecosistemas y Conectividad, 2021),

En China, los planes nacionales como el Plan de Acción Nacional de Conservación Energética (2014) y el Plan de Desarrollo Urbano de Bajo Carbono (2013), se complementan con regulaciones locales en Beijing y Shanghái, que impulsan la ecologización urbana (Luo et al., 2021).

En América Latina, los avances son principalmente municipales. En México, el Plan Municipal de Infraestructura Verde 2021-2024 de Mérida (Unidad de Medio Ambiente y Bienestar Animal, 2021), establece medidas para incorporar techos verdes en el desarrollo urbano. Brasil, mediante su Política Municipal de Educación Ambiental en Recife (Cidade Do Recife, 2014) con un enfoque educativo y participativo en la sensibilización de la población sobre las ventajas de las prácticas sustentables.

Finalmente, Canadá, Portugal y España tienen un equilibrio entre planes nacionales y locales. Canadá impulsa la Estrategia de Edificios Verdes, la cual promueve la adopción de techos verdes y otras ecotecnias (Natural Resources Canada, 2024). Lo anterior se complementa con políticas locales como la Política de Construcción Ecológica de Vancouver y la Política de Ecología Urbana de Montreal (Montréal, 2020). España implementa el Plan Rehabilita de Madrid (Ayuntamiento de Madrid, 2023) y el Plan de Acción por la Energía Sostenible (PAES) de Valencia (Ajuntament

de Valencia & Regidoria de Qualitat Mediambiental, 2010). Mientras que en Portugal, los planes nacionales se articulan con la Política de Infraestructuras Verdes de Lisboa (Municipio de Lisboa, 2023; Presidência do Conselho de Ministros, 2020). Estos países evidencian que la integración de políticas nacionales y locales puede fomentar la adopción de techos verdes, maximizando los beneficios ambientales y económicos en distintos niveles de gobernanza (Municipio de Lisboa, 2023; Presidência do Conselho de Ministros, 2020)..

Tabla 2. Planes y políticas

País	Nacionales	Locales
ARG	-	-
BRA	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Política Municipal de Educación Ambiental (Recife)
CHIL	-	-
COL	-	-
MEX	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plan Municipal de Infraestructura Verde 2021-2024 (Mérida)
EUA	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plan de Sostenibilidad de Chicago ▪ Plan de Acción Climática de Filadelfia
CHI	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plan de Acción Nacional de Conservación Energética (2014) ▪ Plan de Desarrollo Urbano de Bajo Carbono en China (2013) ▪ Plan Nacional de Adaptación al Cambio(Dong et al., 2020) Climático y Planes Sectoriales ▪ Beijing Green Roof Code (DB11/T281-2005) (Dong et al., 2020) 	-
ESP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estrategia Nacional de Infraestructura Verde y de la Conectividad y Restauración Ecológicas (2021) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plan Rehabilita de Madrid 2023 ▪ Plan Verde y de Biodiversidad de Barcelona 2020 ▪ Plan de Acción para la Energía Sostenible (PAES) de Valencia
POR	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plan Nacional de Acción para la Energía Sostenible (2006) ▪ Estrategia Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2010) ▪ Plan Estratégico para la Regeneración Urbana Sostenible (2008) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Política de Infraestructuras Verdes de Lisboa (2015) ▪ Plan director Municipal de Lisboa (1994) ▪ Política de Gestión de Espacios Verdes de Coimbra (2017)
CAN	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La Estrategia de Edificios Verdes de Canadá (CGBS) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Política de construcción ecológica de Vancouver ▪ Política de Ecología Urbana de Montreal

2.2.3 Estándares nacionales y locales

Los estándares técnicos refuerzan la aplicación práctica de las políticas, se observa una tendencia al liderazgo en la reglamentación por parte de los municipios. En EUA destacan la Herramienta de Instalaciones Sostenibles y normas específicas (RP-14, VR-1, VF-1) (U.S. General Services Administration, 2024a, 2024b), así como códigos locales como el Código Verde de California (State of California, 2022), además de guías específicas de Washington D.C. y Nueva York (Department of General Services Washington, 2006). (Department of General Services Washington, 2006).

En Chile se ha desarrollado el estándar nacional NCh3626:2020, que establece terminología, clasificación y requisitos para techos verdes. Mientras que China impulsa estándares local alineadas con las iniciativas de ciudades verdes en Beijing y Shanghái. En cambio, Brasil no dispone de estándares nacionales ni locales, lo que sugiere una etapa inicial en la regulación de techos verdes.

En Argentina, Colombia, México, España, Portugal y Canadá, los avances normativos se han dado principalmente a nivel local. Ejemplo de ello son la Guía Técnica de Techos Verdes en Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá & Secretaría Distrital de Ambiente, 2011) y la ya mencionada NADF-013-RNAT-2007 para la CDMX (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), 2018) En Canadá diversas ciudades como Toronto, Vancouver y Montreal han desarrollado estándares propios adaptados a sus condiciones climáticas y urbanas (Anderson et al., 2022; Anderson & Gough, 2022; City of Toronto, 2021; City of Vancouver, 2023b; Mitrovic, 2010; Ringsred et al., 2021).

Tabla 3. Estándares

País	Nacionales	Locales
ARG	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manual de buenas prácticas para el diseño y la construcción de techos verdes (Córdoba) ▪ Código de Edificación de la Ciudad de Buenos Aires
BRA	-	-
CHIL	<ul style="list-style-type: none"> ▪ NCh3626:2020 Techos verdes. Terminología, clasificación y requisitos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Guías locales de diseño
COL	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Resolución 6423 "Guía Técnica de Techos Verdes" - Bogotá
MEX	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ NADF-013-RNAT-2007 (2008)
EUA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Herramienta de instalaciones sostenibles ▪ RP-14 Norma de diseño contra viento ▪ VR-1 Procedimiento para investigar la resistencia a la penetración de raíces ▪ VF-1 Directrices de diseño contra incendios 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Guía Técnica de Washington D.C. ▪ Código de construcción verde de California ▪ Guía de Techos Verdes de NYC
CHI	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Guía Técnica para el Diseño de Edificaciones Ecológicas (2017) ▪ Política de ciudades verdes (Beijing, Shanghai)
ESP	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Guía Municipal de Barcelona ▪ Reglamento de Urbanismo de Valencia
POR	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reglamento Municipal de Rehabilitación Urbana de Lisboa (2016) ▪ Reglamento de Construcción de Oporto (2009) ▪ Reglamento de Desempeño Energético de Edificaciones (2006)
CAN	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reglamento de techos verdes en Ontario ▪ Código de construcción ecológica de Columbia Británica ▪ Reglamento sobre techos verdes de la Ciudad de Toronto ▪ Estrategia de Edificación Verde de Vancouver ▪ Estándares de Construcción Calgary ▪ Estándar Verde de Toronto

2.2.4 Desafíos y limitaciones

Los gobiernos locales y las autoridades urbanas han incorporado las SbN, entre ellos los techos verdes, en la planificación urbana que contribuyan a mejorar la salud pública y la calidad ambiental. Sin embargo, la falta de políticas públicas y mecanismos de apoyo adecuados constituye una de las principales barreras para su adopción a gran escala y de manera accesible para toda la población. En ausencia de este respaldo institucional, los techos verdes corren el riesgo de mantenerse como una alternativa de nicho, sin alcanzar un impacto urbano generalizado en el futuro cercano (Brudermann & Sangkakool, 2017).

Las políticas son una herramienta para abordar la falta de conciencia sobre los techos verdes y promover la educación al respecto. Sin embargo, las políticas sin herramientas de implementación no son efectivas para aumentar la instalación de techos o muros verdes en las ciudades (Green Roofs for Healthy Cities, 2023).

La falta de estándares nacionales sugiere una fragmentación en la implementación de techos verdes. Los esfuerzos se concentran en ciudades específicas con políticas pioneras, lo que puede limitar una adopción más generalizada en el país. En términos de gobernanza, esta fragmentación indica una autonomía local que está ganando fuerza, pero podría beneficiarse de una mejor coordinación y estandarización a nivel nacional. Mientras que la presencia de estándares tanto nacionales como locales sugiere una estrategia integral que combina directrices generales con adaptaciones regionales. Esto puede facilitar una adopción amplia y coherente de techos verdes a lo largo del país.

CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO

3.1 Ciudad de México (CDMX)

La CDMX es la entidad federativa capital de los Estados Unidos Mexicanos, con una superficie total aproximada de 1,495 km², lo que representa el 0.1% de la extensión nacional. En 2020, su población alcanzó más de 9.2 millones de habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2021). La administración general recae en el Gobierno de la CDMX, su estructura territorial esta segmentada en 16 demarcaciones, denominadas alcaldías (Congreso de la Ciudad de México, 2023).

La CDMX alberga las instituciones políticas nacionales y la mayor concentración de actividades tanto económicas como culturales (Graizbord & González Granillo, 2019; Lezama et al., 2002). El desarrollo urbano de la CDMX está condicionado por su emplazamiento geológico, caracterizado por una heterogeneidad edáfica resultante de su ubicación en una cuenca de origen lacustre. La estructura del suelo se diferencia en cuatro zonas principales (Cárdenas-Soto et al., 2021; Gobierno de la Ciudad de México, 2014; Mayoral & Pérez, 2024; Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil, 2021):

- Zona Lacustre: Localizada en el área central y oriental, se caracteriza por depósitos de arcillas blandas con alta compresibilidad. Este material impacta en los procesos de subsidencia diferencial del terreno, lo que influye en la planificación y estabilidad de la infraestructura urbana.
- Zona de Transición: Ubicada en la periferia de la zona lacustre, presenta una composición mixta de depósitos lacustres y materiales aluviales, con propiedades intermedias de resistencia y asentamiento.
- Zona de Lomas: En la porción poniente y sur-poniente, se compone de suelos derivados de materiales volcánicos y aluviales que presentan mayor estabilidad estructural y capacidad de soporte.
- Zonas Montañosas: Localizadas principalmente al sur y suroeste de la CDMX, están conformadas por rocas volcánicas, basaltos y tobas, lo que confiere las condiciones geológicas más estables

La capital se sitúa en una cuenca endorreica cerrada, una condición geográfica que ha implicado históricamente la sobreextracción de agua subterránea como principal mecanismo de abastecimiento urbano pero la sobreexplotación crónica ha provocado el descenso de los niveles freáticos, la compactación de los acuíferos y la reducción de la capacidad de almacenamiento (Khorrami et al., 2023; Palma, Parker, et al., 2022; Palma, Rivera, et al., 2022). Este proceso ha resultado en la compactación de los suelos de origen lacustre, contribuyendo al fenómeno de hundimiento del subsuelo, causando daños a la infraestructura, mayor riesgo de inundaciones y fallas superficiales (Chaussard et al., 2021; Cigna & Tapete, 2021).

El suministro hídrico de la CDMX se ve afectado por la dependencia externa al sistema Cutzamala (Banderas & González-Villega, 2019; García Sánchez et al., 2023; Lovera Pons et al., 2018). Además de esto, el crecimiento urbano ha sustituido los terrenos naturales y permeables por edificios, o carreteras, reduciendo las zonas donde el agua pluvial puede infiltrarse en el suelo. Esto impide que el agua llegue a los acuíferos, aumenta la escorrentía superficial y el riesgo de inundaciones (Bonasia et al., 2023; Canteiro et al., 2025; Mautner et al., 2020; Ríos-Sánchez et al., 2024).

La urbanización vertical de la CDMX se ha acelerado entre 2002 y 2012, a lo largo de los corredores urbanos y en las zonas centrales; las políticas de planificación urbana y las inversiones inmobiliarias han impulsado la densificación y el crecimiento vertical. La expansión vertical responde a la necesidad de la limitación territorial y las presiones demográficas buscando una mejor infraestructura, pero su implementación varía según el barrio, el valor del suelo, las normas de planificación y el riesgo sísmico concentrándose en zonas con suelo estable lo que ha impactado en la cantidad y disponibilidad de IVU (Montejano-Castillo et al., 2020; L. Santa Ana & Santa Ana, 2021; P. Santa Ana et al., 2021).

La gestión de la IVU es una responsabilidad articulada entre niveles de gobierno. En el nivel central, la SEDEMA coordina la planificación, regulación y seguimiento de las AVU a nivel de toda la ciudad. En el ámbito local, las alcaldías mantienen unidades administrativas para la ejecución, mantenimiento y supervisión de espacios verdes públicos, operando en colaboración de la SEDEMA (Gobierno de la Ciudad de México, 2022; Suárez et al., 2011).

Sin embargo, estas dinámicas urbanas afectan los procesos hidrológicos, además de incidir en la disponibilidad y distribución de AVU, un componente que incide en la habitabilidad y resiliencia ambiental. La CDMX al año 2017 tiene un promedio de 7.54 m²AVU/hab, así como una desproporción en la cantidad y disponibilidad de AVU en donde solo seis del total de las alcaldías tienen igual o más de 9m²AVU/hab, valor establecido en la Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal (PAOT, 2008; SEDEMA, 2017).

3.1.1 Antecedentes de las áreas verdes urbanas (AVU)

En las ciudades mexicanas se observa una reducción y desigualdad en la disponibilidad de espacios abiertos, lo cual afecta la calidad de vida de la población urbana. Esta población puede clasificarse en fija y flotante. La población fija son aquellos que residen y realizan sus actividades cotidianas en la ciudad, mientras que la población flotante comprende a quienes circulan regularmente por la ciudad, ya sea por motivos escolares, laborales, turísticos o culturales. Ambas se ven afectadas por ser la escasez de áreas verdes urbanas, que limita los beneficios ambientales, sociales y de bienestar que estos espacios proporcionan (Panaia, 2010).

La CDMX, a lo largo de su historia ha sufrido de distintas transformaciones. Bajo el gobierno de Porfirio Díaz se desarrolló un proyecto urbano con el fin de expandir las áreas verdes, este fue localizado tanto en colonias ricas como en las pobres. Derivado de esto, se crearon en el año 1896 los jardines en la plaza de Santiago Tlatelolco, en 1897 el parque de Chapultepec, en 1899 el jardín de la estación del

Ferrocarril Nacional, en 1901 jardines en la Plaza de la Constitución, en 1904 los jardines de la plaza Río de Janeiro, en la plazuela de Zaragoza, en la plaza del ex Baratillo y en la plaza Abasolo, en 1905 se establecieron los jardines en la plaza Arcos de Belén y en la Cuchilla de Romita, y para 1910 se instauró el parque Balbuena (Martínez et al., 2017). En la década de 1930 después de la Revolución Mexicana resultado de la influencia del movimiento moderno se crearon los primeros conjuntos habitacionales: Balbuena, La Vaquita y San Jacinto (Sánchez Rueda, 2017).

Las primeras edificaciones se construyeron en el año 1950 en las colonias Condesa, Hipódromo e Hipódromo Condesa, y para la década de 1970 comenzó la creación de comercios principalmente del tipo familiar (Gobierno del Distrito Federal, 2000; Porras, 2001). En el período de 1988 a 1994 se promovieron planes para la construcción de las zonas residenciales de Santa Fe y Polanco, se erigieron más edificaciones en las colonias Condesa, Hipódromo e Hipódromo Condesa, que se vuelven atractivas principalmente por el parque España y México siendo sus principales áreas verdes; también se fomentó la recuperación del lago de Xochimilco y la alameda central (Mattos et al., 2001; Ortiz Guitart, 2006).

Actualmente las múltiples viviendas en la CDMX, establecidas en edificios con poca disponibilidad para poder tener un lugar propio de esparcimiento con un espacio verde (Gómez-Pérez, 2017). Así como las zonas aledañas a ellos con pocas o nulas AVU, al ser estas reemplazadas han desaparecido por la sobreocupación espacial. Los espacios verdes que aún se conservan, como la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, son vitales para mantener la infiltración local y la calidad del agua subterránea (Canteiro et al., 2023, 2025b).

La población marginada es potencialmente susceptible a los efectos del cambio climático (Sánchez Vargas et al., 2011). Existe una tendencia en donde la población de bajos ingresos radican en las periferias de la ciudad instalándose en viviendas

irregulares como lo puede ser la zona norte de la alcaldía GAM (Matus Pérez, 2019; Salinas Arreortua & Soto Delgado, 2019).

3.1.2 Cambio climático y estrategias sustentables para su adaptación

El cambio climático constituye un problema que afecta a todo el mundo y plantea retos adicionales en las regiones urbanas debido a la densidad poblacional, la actividad económica, el uso de materiales que retienen calor como el asfalto o el concreto, la ausencia de áreas verdes y el diseño y la planificación de las ciudades, lo cual provoca olas de calor, inundaciones y contaminación. Algunos efectos del cambio climático en las zonas urbanas son: aumento de las temperaturas, eventos climáticos extremos y el deterioro de la calidad del aire, la escorrentía de aguas pluviales, las inundaciones, las olas de calor y los problemas de salud (Barriuso & Urbano, 2021).

En el caso de México, se ha establecido un marco normativo destinado a orientar las acciones en materia de cambio climático. Uno de los instrumentos para ello es la Ley General de Cambio Climático en el 2012. Este marco es obligatorio a niveles nacional, estatal y municipal, la cual faculta a las autoridades de los diferentes niveles de gobierno a regular las acciones implementadas que adapten y enfrenten el cambio climático. A pesar de la aprobación de esta ley se requiere la creación de mecanismos para vigilar su cumplimiento y establecer sanciones ante su incumplimiento (Sosa Baldivia & Ruíz Ibarra, 2017).

Como se mencionó en el punto 3.1 la CDMX, tiene dificultades en la gestión hídrica y la disponibilidad de AVU. Aunado a esto el cambio climático, la expansión urbana y el ICU convergen en los impactos negativos al medio ambiente de la capital del país. La expansión urbana aumentará para 2060 las temperaturas promedio, máxima y mínima cerca de la superficie hasta en 0.6°C, 1.3°C y 2.6°C (Miquelajauregui et al., 2024).

La frecuencia y magnitud de las olas de calor están aumentando más rápido que la tasa de expansión urbana, lo que agrava el riesgo de calor extremo (Wei et al., 2021). Asimismo, existe una correlación positiva entre la intensidad de la ICU y las concentraciones de material particulado (PM2.5 y PM10), lo que indica que las condiciones urbanas más cálidas agravan la contaminación del aire (Méndez-Astudillo et al., 2022).

Ante este panorama, la CDMX ha implementado distintas estrategias dirigidas a la adaptación climática. Uno de los programas es el de revegetación urbana, que ha llevado a la siembra de más de 30 millones de árboles y plantas. Estas medidas han facilitado la recolección anual de alrededor de 823 tonCO₂, lo que equivale a las emisiones generadas de al menos al impacto anual de aproximadamente de 520 automóviles, considerando un vehículo promedio con un recorrido anual de 10 000 km y un rendimiento de 14.5 km/L (EPA, 2025). Asimismo, a través del programa “Sembrando Parques”, se han establecido y restaurado 16 áreas públicas, fomentando la economía circular y disminuyendo la extracción de recursos naturales (SEDEMA, 2022).

Adicionalmente, la CDMX ha implementado programas educativos en comunidades y escuelas, destinados a promover prácticas sustentables y la participación de los ciudadanos. Asimismo, el fomento de hábitos de consumo responsables se ha fortalecido a través de iniciativas como el programa “Las tres erres mágicas”, de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). Esta estrategia se fundamenta en tres ideas: reducir, reutilizar y reciclar, con la finalidad de minimizar la producción de residuos, disminuir las emisiones de GEI relacionadas con el manejo de desechos y promover una cultura ambiental enfocada en el uso responsable de los recursos naturales (CONANP, 2020).

La adopción de SbN es un método integral que se distinguen por su multifuncionalidad, flexibilidad y capacidad de adaptación a condiciones climáticas inciertas. Estas alternativas ayudan a reducir efectos como las inundaciones, las

emisiones de GEI y el fenómeno de ICU, mientras favorecen la seguridad en el agua, la energía y la alimentación, además de mejorar el bienestar humano. Entre las estrategias que se pueden emplear está el desarrollo de IVU con espacios públicos y accesibles ya sea parques o zonas forestales (Litardo et al., 2020; Wang et al., 2016; Weng et al., 2004).

Los factores mencionados: crecimiento vertical sostenido y escasez de AVU, sustentan el fomento de la expansión de los techos verdes como SbN en la CDMX. La implementación de techos verdes se presenta como una estrategia de densificación vegetal que aprovecha el espacio vertical disponible (SEDEMA, 2017), buscando integrar vegetación a los inmuebles. Esto permite mitigar el efecto de ICU y mejorar la calidad del aire (SEDEMA, 2017; C40, 2025), además de complementar la gestión hídrica mediante la retención de aguas pluviales, con ello aumentar la resiliencia de la ciudad y adaptabilidad ante el cambio climático.

3.1.3 Techos verdes como AVU en la CDMX

Según el inventario de áreas verdes de la SEDEMA actualmente sólo hay 23,511.05m² de techos verdes, en once alcaldías. La alcaldía Iztapalapa del total de su AVU el 22.2% (5.4m²AVU/hab.), corresponde a techos verdes, de este le sigue Tláhuac con 18.36% (8.4m²AVU/hab.), y Álvaro Obregón con 12.07% (6.6m²AVU/ab.), cabe mencionar que en ninguno de los tres casos alcanzan los 9m² de AVU/hab. que exige la legislación.

El 10 de marzo del 2023, se realizó una entrevista con la directora de Infraestructura Verde de la SEDEMA la Maestra Maritza Hernández Solís, como parte de una entidad pública responsable de la protección ambiental de la CDMX respecto a su opinión en términos de emplear los techos verdes como alternativa para aumentar las AVU. La directora Hernández menciona que el enfoque primordial de la SEDEMA es aprovechar el limitado presupuesto direccionándolo a las AVU abiertas a nivel de suelo ya que tienen un precio bajo por metro cuadrado y obtener mayores resultados al beneficiar más personas, en comparación de destinar recursos

económicos para la creación de techos verdes, los cuales tienen un precio actual en el mercado no viables como posible alternativa.

Asimismo, comentó que no se podría promover la instalación de techos verdes en inmuebles públicos como escuelas o edificios del gobierno ya que la mayoría de estos son construcciones antiguas que de proyectar la adición de un techo verde requerirían una inversión extra para lo cual, actualmente no se cuenta con esos recursos.

La Maestra Hernández menciona que el uso de los techos verdes si es una opción complementaria para incrementar la infraestructura verde en la CDMX, pero la oportunidad está en el sector privado, puesto que existe la posibilidad de invertir durante la remodelación de aquellos inmuebles que lo requieran o en la construcción de nuevos edificios ya que se debe seguir los reglamentos de construcción y es en este instrumento legal donde se podría integrar la naturación de los techos como obligatorio según la superficie delimitada.

Respecto a la actualización de inventario de AVU que se debe realizar cada cinco años, declararon que no están considerando poner al día la información referente a los techos verdes ya que no cuentan con la infraestructura suficiente para ello, por lo que hay un vacío de información, alineado a uno de los objetivos a cumplir por este proyecto generando los datos que complementen el registro de los techos verdes.

3.2 Techo verde ligero extensivo (TVLE) como alternativa al techo verde convencional (TVC)

A pesar de los beneficios de los techos verdes, existe un dilema ambiental con respecto a los materiales utilizados en la construcción de techos verdes. Los Análisis de Ciclo de Vida (ACV) revelan la existencia de una huella ecológica de materiales como polietileno y poliestireno utilizados en ellos. Sin embargo, las propiedades inherentes de los techos verdes, como la reducción de CO₂ y la regulación de la temperatura, resaltan su potencial como sumideros de carbono (Dvorak & Volder, 2010). Existe un creciente enfoque en los resultados de los ACV y la exploración de materiales alternativos, enfatizando el uso histórico de materiales locales naturales y el cambio hacia una economía circular (EC) con materiales reciclados o reutilizados (Meng et al., 2020; Salmenperä et al., 2021; Savini, 2021).

La industria de instalación de techos verdes puede mejorar la eficiencia, reducir su huella de carbono y promover la sustentabilidad al minimizar el consumo de recursos naturales y energía. Reutilizar o reciclar materiales puede llevar a un bajo impacto ambiental y producir materiales de alto valor agregado, lo que potencialmente maximiza las ganancias (Gutiérrez et al., 2016; Nußholz et al., 2020). A su vez, los techos verdes extensivos requieren de menor demanda de infraestructura, ya que el espesor del sustrato necesario y el tipo de vegetación que se coloca es de baja dimensión, el peso adicional que será añadido a la estructura donde sea instalado es relativamente bajo e implica costos de instalación, acciones de mantenimiento y riego poco frecuentes (López-González et al., 2020).

La EC ha surgido como un enfoque para optimizar la utilización de recursos y reducir la presión ambiental, ya que prioriza la redefinición de procesos y promueve el reciclaje de materiales para fomentar modelos de negocio más sustentables (Murray et al., 2017). Los principios globales de la economía circular incluyen la simbiosis industrial, la prolongación de la vida útil de los productos y las redes globales de reciclaje (Gregson et al., 2015). Estos principios también promueven el uso de fuentes de energía renovable, la reducción de los desechos de producción, la

minimización del desperdicio de alimentos y la mejora de la calidad de vida en todos los segmentos de la sociedad (Roleders et al., 2022). Además, incluyen la conservación de energía, el consumo y la producción regenerativos y respetuosos con el medio ambiente, y un cambio hacia prácticas sustentables (Horbal et al., 2021).

La innovación dentro de la economía circular puede ser impulsada por la colaboración, la experimentación y las demostraciones para maximizar los recursos materiales y minimizar los residuos (Konietzko et al., 2020). Localmente se ha comprobado la viabilidad de utilizar materiales en un TVLE de 8m² en la Ciudad de México con paja como material orgánico residual (MOR) en sustitución de la capa drenante, logrando reducir la huella de aproximadamente en 4kgCO₂ (Cervantes-Nájera, 2021), estas diversas alternativas son posibles al optimizar el rendimiento y la sustentabilidad de esta SbN.

De manera internacional a través de una revisión de alcance enfocada en el desarrollo de utilizar materiales alternativos en la estructura de un techo verde se encontraron 68 artículos de acceso abierto dentro de los cuales a continuación se describen algunos resultados. El uso de biocarbón, como un material elaborado a partir de residuos, se ha integrado en sustratos para techos verdes se centra en sus propiedades hidrológicas y su impacto positivo en el crecimiento de las plantas. Demuestra que este material puede mejorar la capacidad de manejo de aguas pluviales y su disponibilidad para las plantas, mejorando su desarrollo (Olszewski & Eisenman, 2017) al reducir la escorrentía, el peso y la densidad del sustrato (Cao et al., 2014; S. Huang et al., 2020; Y. Y. Huang et al., 2020; Tan & Wang, 2023). También aumentó la humedad, la temperatura y la porosidad del sustrato, promoviendo el rápido crecimiento de las plantas y el desarrollo de la comunidad microbiana (Chen et al., 2018). Además, los beneficios de retención de nutrientes reducen la lixiviación de nitrógeno y fósforo (Kuoppamäki et al., 2015; Kuoppamäki & Lehvävirta, 2016) en comparación con los sustratos convencionales (Qiu et al., 2020).

Los estudios sobre el uso de materiales a base de corcho en sustratos para techos verdes demostraron que, en comparación con los TVC los materiales a base de corcho mejoran la capacidad de aislamiento térmico (Almeida et al., 2019) y, de igual manera, la retención de agua de lluvia y el desarrollo de la vegetación (Tadeu et al., 2019). Además, la creación de un sistema modular a partir de este material puede reducir las emisiones de calentamiento global en un 74%, considerando que se lograría un mejor drenaje con tableros de corcho de menor densidad (Manso et al., 2018).

Aunque se ha empleado en la capa drenante como material alternativo, el Tereftalato de Polietileno (PET, por sus siglas en inglés) (Nagase, 2020), no es idóneo ya que puede generar microplásticos persistentes en entornos terrestres como acuáticos, similar a los que se encuentran en los techos verdes. De esta forma pueden actuar como sumideros para estas partículas, lo que puede afectar la estructura del suelo, la salud de las plantas y potencialmente entrar en la cadena alimentaria (Khairul Anuar et al., 2022; Pignattelli et al., 2021)

Mientras que el uso de fibra de coco combinados con nódulos de bambú o residuos de polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) en las capas de drenaje son efectivos en la gestión de la calidad del agua, al retener contaminantes, además de mostrar un pH favorable, bajos niveles de amonio, mejor cobertura y supervivencia de las plantas (Naranjo et al., 2020). Otra investigación que integró el coco en una mezcla con agregados ligeros de arcilla expandida y toba fina como un sustrato mejorado para el crecimiento y la aireación de las plantas (A'saf et al., 2020), logró un resultado similar en condiciones de sequía al agregar un polímero hidrofílico a una mezcla con perlita (Ju et al., 2020).

Por otro lado, el uso de residuos de papel reciclado en forma de pellets de lodo en el sustrato afectó la fertilidad, pero promovió el desarrollo de ciertas especies de plantas y la biodiversidad a largo plazo (Vannucchi et al., 2018). Las migajas de

caucho reciclado como material drenante en techos verdes reduce las temperaturas internas de los edificios durante los períodos de enfriamiento (Naranjo et al., 2020; Pérez et al., 2012). El uso de sedimentos de ríos contaminados como sustrato para techos verdes se centra en la retención de nutrientes y el rendimiento general del sustrato (Zhang et al., 2018).

La EC es un marco económico y el ACV como herramienta metodológica, ambos tienen como objetivo garantizar que las adaptaciones al cambio climático como las SbN y la IVU sean eficientes, las cuales a su vez ofrecen SE implementando diversas prácticas en las ciudades, como lo pueden ser con el TVLE. A continuación, la Figura 1 ilustra la interconexión entre algunos de los conceptos abordados en los dos capítulos anteriores (Cervantes-Nájera et al., 2024).

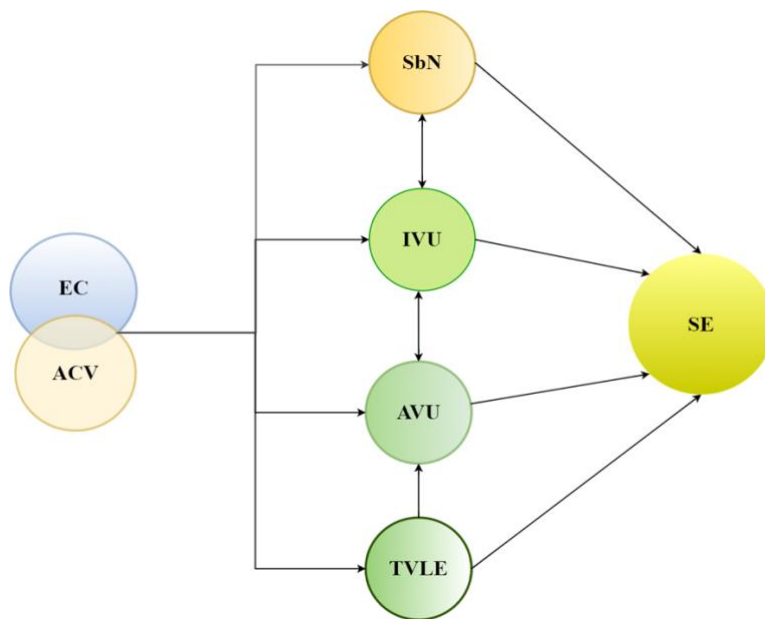


Figura 1. Interconexión de conceptos

Fuente: Cervantes-Nájera et al., 2024

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

4.1 Generalidades de la metodología

El conjunto de métodos se seleccionó para dar cumplimiento a los objetivos establecidos, así como para comprobar la hipótesis planteada. Según lo descrito anteriormente un techo verde es una SbN sustentable que impacta ambiental, social y económicamente, esto se expone en la Figura 2. Esta metodología propuesta del tipo mixta abordará las tres aristas considerando en cada una de ellas los métodos y resultados esperados en la Tabla 4 y en la Tabla 5 las variables que la conforman. La finalidad de la metodología es obtener los resultados suficientes que nutran la proyección de adopción a gran escala en la CDMX y a su vez la creación de recomendaciones para incentivar su aplicación.



Figura 2. Diagrama general de la metodología

Tabla 4. Métodos según la dimensión de la sustentabilidad

Dimensión de la sustentabilidad	Método	Resultado esperado
Ambiental	Recopilación de información sobre techos verdes en la CDMX	Inventario georreferenciado e histórico de los techos verdes en CDMX y sus condiciones climatológicas.
	Análisis de la calidad de vegetación y captación de CO ₂	Cantidad de CO ₂ capturado/m ² por los techos verdes de la CDMX.
	Análisis cualitativo por medio del Índice de Vegetación por Diferencia Normalizada Verde-Rojo (VARI)	Imágenes renderizadas que presenten la calidad de la vegetación en techos verdes de estudio.
	Análisis comparativo de ciclo de vida (ACV) de la cuna a la puerta	La cantidad de huella de carbono disminuida de un TVLE en comparación de un TVC.
	Análisis del desempeño térmico	El desempeño de un TVLE de acuerdo con los valores obtenidos de la radiación.
	Análisis de decisiones multicriterio basado en Sistema de Información Geográfica (SIG)	Mapa de la CDMX con zonas y sitios prioritarios para la instalación de techos verdes.
Social	Estudio del impacto social	Percepciones, opiniones, experiencias, recomendaciones, expectativas, pensamientos de la sociedad en sector público y privado respecto al uso de techo verde.
Económico	Análisis costo beneficio (ACB)	Rentabilidad del TVLE, valor presente neto, tiempo de retorno, y costo evitado

Tabla 5. Variables de la metodología

Variables independientes	Variables dependientes
TVLE	Radiación Temperatura
Techo verde convencional	Calidad de la vegetación: índice VARI y MSAVI
Techos verdes existentes de la CDMX	Captación de CO ₂

4.2 Implementación de un TVLE como alternativa al TVC

En diciembre de 2022 como resultado de la autorización de la propuesta de proyecto de innovación tecnológica en la Convocatoria emitida por la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) fue posible la instalación de un TVLE de 6m² de superficie con una combinación de 50-50% de paja con fibra de coco como MOR en la capa drenante. Se instaló en la caseta de vigilancia de la entrada principal del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD) (Figura 3). La estructura de este TVLE se conforma según la Tabla 6, tendrá como funcionalidad ser un laboratorio vivo en el desarrollo de este trabajo de tesis.

Tabla 6. Detalle de la estructura del TVLE del CIIEMAD

Capa	Material	Cantidad
Impermeabilizante	Impermeabilizante de acrílico fibrado	8.05 m ²
Anti-raíz	Impermeabilizante de membrana asfáltica aplicación anti-raíz	8.05 m ²
Geotextil	Geotextil de 160g	8.05 m ²
Drenante	Fibra de coco	20 kg
	Paja	20 kg
Sustrato	50% composta – 50% tepojal	620 kg
Vegetación	<i>Sedum morganianum</i> (Burrito)	20 unidades
	<i>Sedum Pachyphyllum</i> (Dedos de Dios)	19 unidades
	<i>Sedum Nussbamerianum</i> (Sedo dorado)	20 unidades
	<i>Sedum Dendroideum</i> (Lagrima de María)	19 unidades
	<i>Sedum Rubrotinctum</i> (Dedo de niño)	20 unidades
	<i>Graptopetalum paraguayense</i> (Planta madre perla o planta fantasma)	19 unidades
	<i>Echeveria agavoides</i> (Echeveria oscura)	19 unidades
	<i>Echeveria elegans</i> (Rosa de alabastro)	20 unidades

La elección de los MOR se estableció por las propiedades de estos, como se describe a continuación. La fibra del coco está compuesta por lignina, celulosa y hemicelulosa y tiene propiedades idóneas para ser usada como sustrato, por

ejemplo, posee baja conductividad, resistencia al impacto, a las bacterias y al agua (Fabbri et al., 2021; Quintero & González, 2006). Resultado de las características químicas que esta posee, es beneficiosa en los sustratos utilizados para diversas plantaciones, proporciona aireación, alta retención de humedad y estabilidad (Quiñónez, 2014).

La paja es un residuo vegetal que puede ser utilizado como base para la elaboración de sustratos para el crecimiento de diversas especies vegetales, es un material lignocelulósico difícil de biodegradar que puede retener del 20 al 30% de agua (Bagheri Novair et al., 2024; Nieves et al., 2006; Yang et al., 2023). En la producción de *P. Ostreatus*, un hongo comestible, fue el mayor eficiente en comparación con otros sustratos (Díaz Muñoz et al., 2019), así mismo, en combinación con tezontle se obtuvieron resultados positivos en el cultivo de plántulas de jitomate.

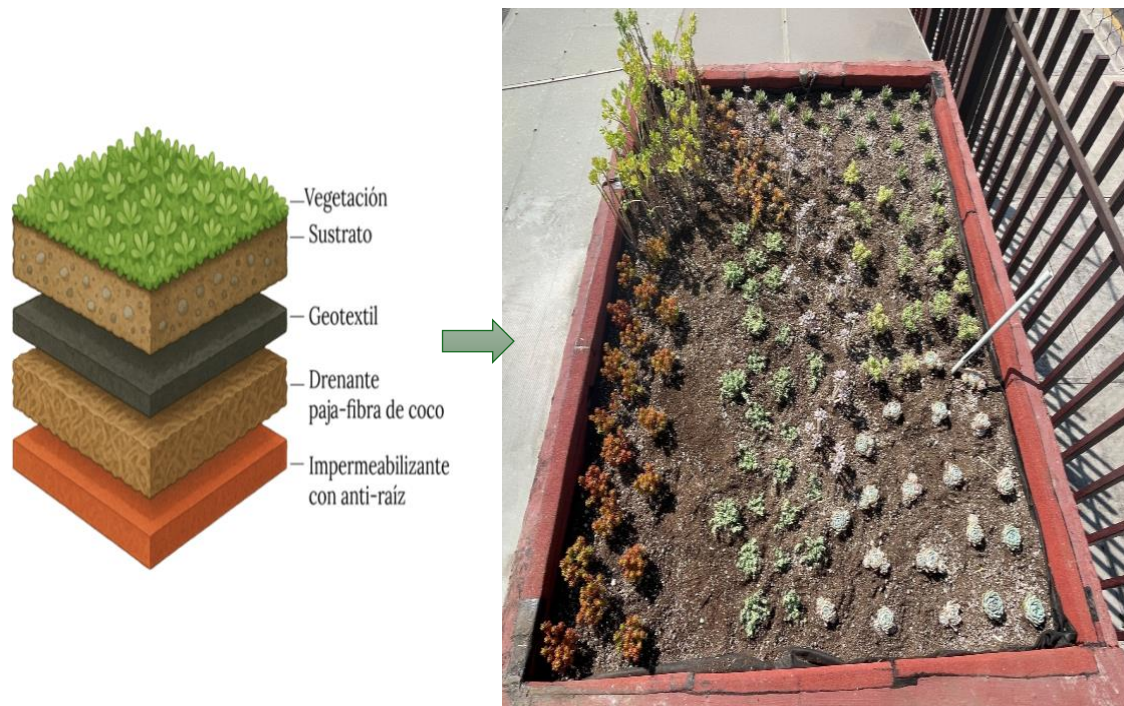


Figura 3. TVLE del CIEMAD con MOR fibra de coco-paja como capa drenante

4.3 Impacto ambiental del TVLE y de los TVs (inventario) en la CDMX

4.3.1 Creación del inventario de techos verdes de la CDMX

Para la creación de un inventario de techos verdes en la Ciudad de México, se desarrolló una red de contactos a través de empresas instaladoras y expertos en la materia. Inicialmente, se solicitó información a varias empresas dedicadas a la instalación de techos verdes en la CDMX, como lo son: Recuver, Generación verde, Ecoyaab Plántica, Azoteas verdes, Geo productos mexicanos, LiveRoof y Sistemas verdes.

Entre estas empresas, Recuver nos dirigió al primer instalador de un techo verde en la CDMX, el biólogo Jerónimo Reyes, quien fue el principal nexo quien nos recomendó a cinco actores clave especialistas en la adopción de techos verdes: cuatro arquitectos y una maestra de la Universidad de Chapingo.

El siguiente paso fue llevar a cabo el contacto, programar una reunión en la cual se realizó la presentación del proyecto doctoral para posteriormente solicitar a cada uno, desde su experiencia datos fundamentales como el nombre y/o la ubicación del edificio, lo que permitió geolocalizar cada instalación en Google Earth Pro. Este paso fue esencial para obtener coordenadas precisas y crear una primera base de datos.

De acuerdo con cada ubicación y empleando las herramientas de Google Earth Pro se documentaron el año de instalación, el tipo de inmueble, la superficie naturalizada en metros cuadrados, el tipo de techo verde, y la antigüedad del edificio; con ello se enriqueció la base de datos formando el inventario de techos verdes.

La siguiente fase del proyecto involucró el uso de herramientas avanzadas de análisis geoespacial. Utilizando QGIS, un software de SIG, se crearon y analizaron mapas detallados que muestran la distribución de techos verdes en la CDMX. Esta visualización facilitó la identificación de áreas con mayor concentración de techos verdes y permitió evaluar la extensión y el impacto de esta estrategia en el entorno urbano.

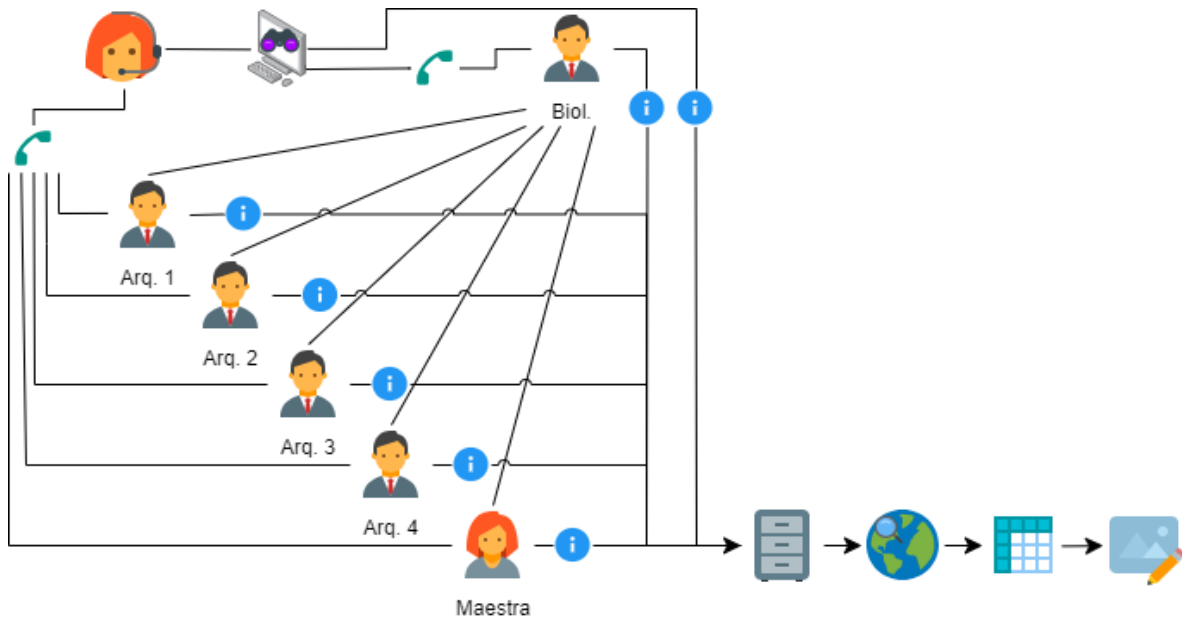


Figura 4. Mapa networking para la creación del inventario de techos verdes en la CDMX

4.3.2 Análisis de la calidad de vegetación y captación de CO₂

La plataforma Crop Monitoring (CM) del proveedor EOS Data Analytics (EOSDA) se emplea comúnmente para evaluar la calidad de la vegetación en zonas agrícolas ya que proporcionan datos actualizados que permiten realizar análisis sobre la salud y densidad de las plantas en tiempo real a través de diversos índices de vegetación como el Índice de Vegetación por Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) y el índice de vegetación ajustado al suelo modificado (MSAVI, por sus siglas en inglés) (EOS Data Analytics, 2025b).

En este caso se emplea para obtener datos históricos sobre la vegetación y las condiciones meteorológicas para estudiar el comportamiento de los techos verdes a lo largo de cinco años. Esto permite analizar su impacto ambiental, evaluar el rendimiento en la absorción de agua de lluvia, la reducción de la temperatura superficial y la mejora de la calidad del aire en las ciudades (EOS Data Analytics, 2025a, 2025b).

El flujo de trabajo presentado en la Figura 5 detalla el proceso sistemático para el análisis de techos verdes en la CDMX utilizando datos satelitales y herramientas de

monitoreo geoespacial. El primer paso consiste en la localización y dibujo de polígonos de los techos verdes mediante Google Earth Pro (GEP). Este software permite delimitar las áreas de interés y exportar los polígonos en formato .kml. Posteriormente, estos archivos se importan a CM, donde se verifica su alineación con imágenes satelitales para asegurar la precisión en la identificación de las zonas analizadas.

En la configuración de parámetros en CM, se selecciona la fuente de datos satelitales Sentinel-2 y se define un alcance temporal de cinco años (del 1 de enero de 2019 al 31 de diciembre de 2023). Además, se determina el índice MSAVI como métrica principal y se incluyen los datos meteorológicos de temperatura y precipitaciones. Una vez configurados los parámetros, se procede a descargar las imágenes satelitales en formatos .tiff y .shp, junto con los datos climáticos en formato Excel, considerando fechas representativas de las temporadas de lluvias y secas.

El paso de limpieza y organización de datos se realiza para garantizar la calidad del análisis. Este proceso implica filtrar las columnas relevantes, como Fecha, MSAVI, Temperatura (mínima y máxima) y Precipitación, se reduce y depura aproximadamente 1,700 registros. Después de esta etapa, los datos se reorganizan cronológicamente para facilitar su interpretación. Con los datos limpios, se crean gráficos que relacionan el índice MSAVI y las lluvias anuales, así como promedios de estos valores a lo largo de los años. Además, se identifican tendencias climáticas y de vegetación.

Finalmente, en la etapa de creación de archivos GIF, las gráficas y mapas obtenidos se integran en una presentación en PowerPoint, la cual se guarda en formato .gif para facilitar su visualización en GEP.

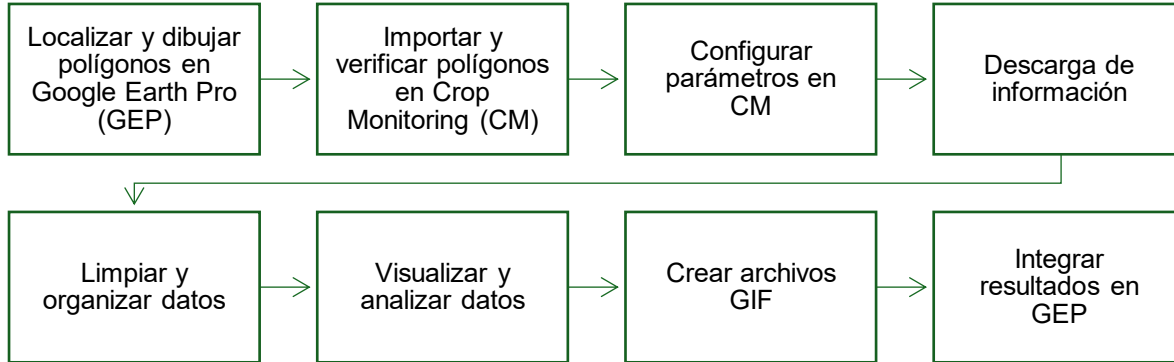


Figura 5. Proceso para el análisis de calidad de vegetación

Los archivos GIF se agregan en los puntos correspondientes de los polígonos en GEP, proporcionando una herramienta interactiva que permite observar la evolución temporal y espacial de los techos verdes en la CDMX. Este proceso se realiza para los 55 techos verdes, en estos se realizará la estimación de la captación de CO₂

Respecto al análisis cualitativo de la vegetación, se realiza para los techos verdes de estudio, de los cuales a partir de la plataforma CM se descargan archivos .tiff de cada polígono para temporada de lluvias y de secas con la escala de colores para el MSAVI según la Figura 6.

Tabla 7. Techos verdes de estudio

ID	Techo verde
1	Oficinas del Infonavit.
4	American School Foundation (AFS): Fine Arts Center (FAC)
5	AFS: Wellness Center (WEC)
11	Jardín Botánico del Instituto de Biología (JB-IB) - UNAM
15	Jardín contemplativo. Parque La Mexicana (PLM)
29	TVLE CIIEMAD - 1
30	TVLE CIIEMAD - 2



Figura 6. Escala de colores del índice MSAVI
Fuente: Leyenda índice MSAVI CropMonitoring (2024)

4.3.2.1 Cálculo de la captación de CO₂

El MSAVI se deriva de imágenes satelitales, con datos Landsat o Sentinel, y se utiliza para evaluar la cobertura y la salud de la vegetación; con lo cual es posible estimar la captura de carbono sobre el suelo al correlacionarlo con datos de campo (Fardani et al., 2016; Uttaruk & Laosuwan, 2016). Para el análisis cuantitativo de la captura de CO₂ por los techos verdes, se siguió una secuencia de pasos basada en la estimación de biomasa a partir del índice MSAVI y su conversión a carbono y CO₂ (Uttaruk & Laosuwan, 2016).

La primera etapa es transformar la biomasa mediante la fórmula 1. Después se estima contenido de carbono aplicando una fracción de carbono específica, considerando que el 50% de la biomasa seca corresponde a carbono según la fórmula 2. Posteriormente el contenido de carbono se convierte a CO₂ mediante el factor de conversión estándar, donde 1 tonelada de carbono equivale a 3.67 toneladas de CO₂, aplicando la fórmula 3. Finalmente, la masa de CO₂ se convierte

en unidades de ppm usando la fórmula 4, la densidad del aire y las masas molares correspondiente.

$$Biomasa \left(\frac{kg}{m^2} \right) = 0.0259 * e^{0.067 MSAVI} \quad [1]$$

$$Carbono \left(\frac{kg}{m^2} \right) = Biomasa \left(\frac{kg}{m^2} \right) * 0.5 \quad [2]$$

$$CO_2 \left(\frac{kg}{m^2} \right) = Carbono \left(\frac{kg}{m^2} \right) \times 3.67 \quad [3]$$

$$ppm = \left(\frac{masa \ de \ CO_2 \ kg \times 10^6}{densidad \ del \ aire \ \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times volumen \ del \ aire \ (m^3)} \right) \times \frac{PM \ aire}{PM \ CO_2} \quad [4]$$

$$PM \ aire = 28.97$$

$$PM \ CO_2 = 44.01$$

4.3.3 Análisis cualitativo de la calidad de la vegetación en techos verdes de estudio

Existen diversos índices para evaluar la vegetación a través de imagenometría, como el Índice de Visión Verde del Piso que mide el área de vegetación urbana visible en un piso específico de un edificio de la ciudad (Yu et al., 2016). También está el Índice de Vegetación por Diferencia Normalizada Verde-Rojo (VARI, por sus siglas en inglés), el Índice de Razón Simple y el Índice de Vegetación Triangular, que se utilizan para medir la calidad de la vegetación en techos verdes (Moroni et al., 2019).

Asimismo, existe el Índice de Visión Verde Estandarizado es un indicador mejorado de la visibilidad de la vegetación que mitiga el sesgo por la ubicación del sitio y captura mejor la presencia de vegetación en el centro de la ciudad (Kumakoshi et al., 2020). Además el NDVI, previamente mencionado, se utiliza como una medida representativa del nivel de verdor fisiológicamente funcional en la superficie de la vegetación (Faour et al., 2018).

Si bien son diferentes los índices de vegetación estos pueden determinar el índice de área foliar y la radiación fotosintéticamente activa, su rendimiento está limitado por factores como la geometría del dosel y el fondo del suelo (Baret & Guyot, 1991).

Se eligió el índice VARI, para evaluar la calidad de la vegetación, porque supera al NDVI y al índice de vegetación mejorado en el seguimiento de la fotosíntesis de las plantas (Yin et al., 2022). VARI es empleada para evaluar la salud y la densidad de la vegetación en imágenes ráster como una medida que refleja la correlación entre la concentración de clorofila en las plantas con su índice de área foliar, capacidad de absorción de luz y potencial fotosintético (Baret & Guyot, 1991; Yoder & Waring, 1994).

VARI es un indicador confiable e independiente del sitio para detectar la fenología de la vegetación, así como en la detección temprana del verdor de las hojas en primavera y el cambio de color en otoño, y en la diferenciación de tipos de ecosistemas (Motohka et al., 2010).

El proceso para obtener el VARI se describe Figura 7, este comienza con la selección de sitios y obtención de imágenes la cual se realizó por medio de vuelos con vehículos aéreos no tripulados (dron), modelos: DJI Mavic 2, y DJI Mini 3. El procesamiento de imágenes se realizó en el software Qgis donde se cargaron y se transformaron al formato .tiff georreferenciándolo en el sistema de coordenadas WGS 84/ UTM zone 14N EPSG:32614. Posteriormente se empleó la fórmula 5 en la calculadora ráster en Qgis y la creación de capas para el análisis del índice VARI.

$$VARI = \frac{BandaVerde - BandaRoja}{BandaVerde + BandaRoja - BandaAzul} \quad [5]$$

Aunque VARI permite una clasificación de condiciones vegetales, no existe en la literatura un conjunto de umbrales normalizados aplicable a todos los sensores y contextos. Los mapas VARI se visualizan con gradientes de color para representar valores VARI de bajos a altos, pero el uso de color específicos está determinado por el software o las preferencias del investigador (Nazir et al., 2021). Los estudios usualmente definen sus propios umbrales y esquemas de color según la aplicación, el tipo de cultivo o el sitio evaluado (Li et al., 2019; Zhang et al., 2019). Por ello la interpretación del índice en la Tabla 8 es específica de esta investigación como una clasificación contextual al TVLE de estudio.

Tabla 8. Interpretación Índice VARI

Color	Valor VARI	Interpretación
Rojo intenso (#d7191c)	-0.25	Sin vegetación o vegetación muerta/seca; superficies inertes como concreto, grava sin vegetación o techos degradados
Naranja claro (#fdae61)	-0.125	Vegetación escasa, posiblemente plantas estresadas o suelo desnudo con poca cobertura vegetal, también puede ser sustrato seco
Amarillo claro (#ffffbf)	0	Transición; cobertura vegetal baja o vegetación mezclada con suelo o material no vegetado, Vegetación dispersa o suculentas en crecimiento
Verde claro (#abdda4)	0.125	Buena cobertura vegetal; vegetación sana en crecimiento, suculentas densas, arbustos pequeños o magueyes establecidos
Azul (#2b83ba)	0.25	Alta cobertura vegetal y vigor; vegetación densa y bien desarrollada, con buena salud

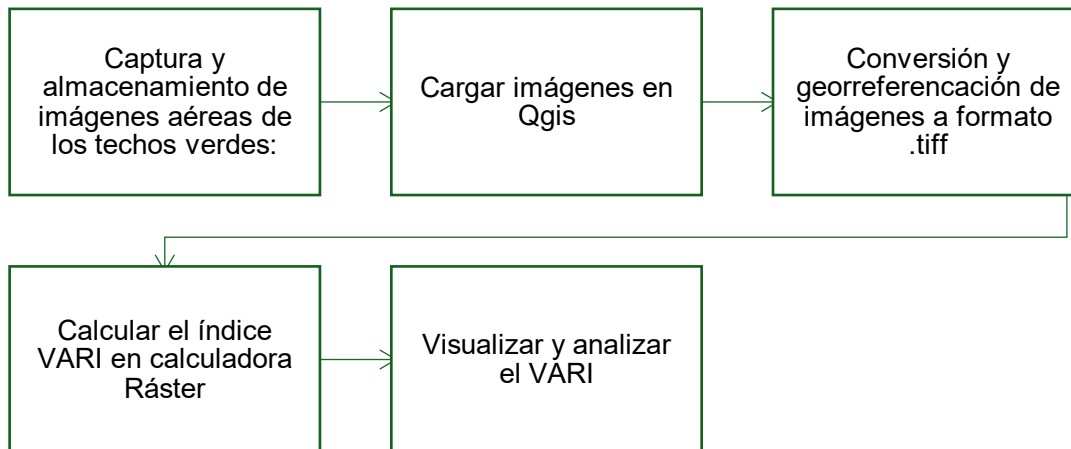


Figura 7. Proceso para la evaluación del VARI

4.3.4 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El ACV permite identificar áreas de mejora en el diseño y los materiales, optimizando el rendimiento ambiental y económico de los techos verdes (Berardi et al., 2014). El ACV de la cuna a la puerta comparativo permite evaluar el impacto ambiental del TVLE y de un TVC. Se medirán las emisiones de GEI en kgCO₂ equivalente dentro de la categoría de impacto "cambio climático", considerando desde la producción hasta el establecimiento de los componentes.

El ACV se realiza en el software OpenLCA regionalizado al país con el método de evaluación impacto ReCipeMidpoint (H). La unidad funcional propuesta se basa en

la revisión de estudios similares, donde la mayoría de los ACV para techos verdes definieron 1 m² como unidad de medida. Además, se estima un tiempo de vida de 40 años (Mithraratne, 2013; Rasul & Arutla, 2020).

El análisis se enfocará en las primeras cuatro capas del techo verde. Las etapas son la extracción de materiales, la producción de las capas y la instalación del techo verde. Se establece flujo del ciclo de vida del TVLE, del cual se generará el análisis de inventario (Figura 8). Finalmente se calculará el porcentaje de la disminución de la HC y el porcentaje de reducción con la fórmula 6. Los límites del análisis son:

- a) La capa de vegetación no genera un impacto negativo al ambiente.
- b) El mantenimiento se considera 0 después de su primer riego y el Segundo una semana después de instalación.
- c) Todos los materiales son de origen mexicano, excepto por el geotextil, el cual tendrá una huella de carbono mayor en la etapa de transporte.

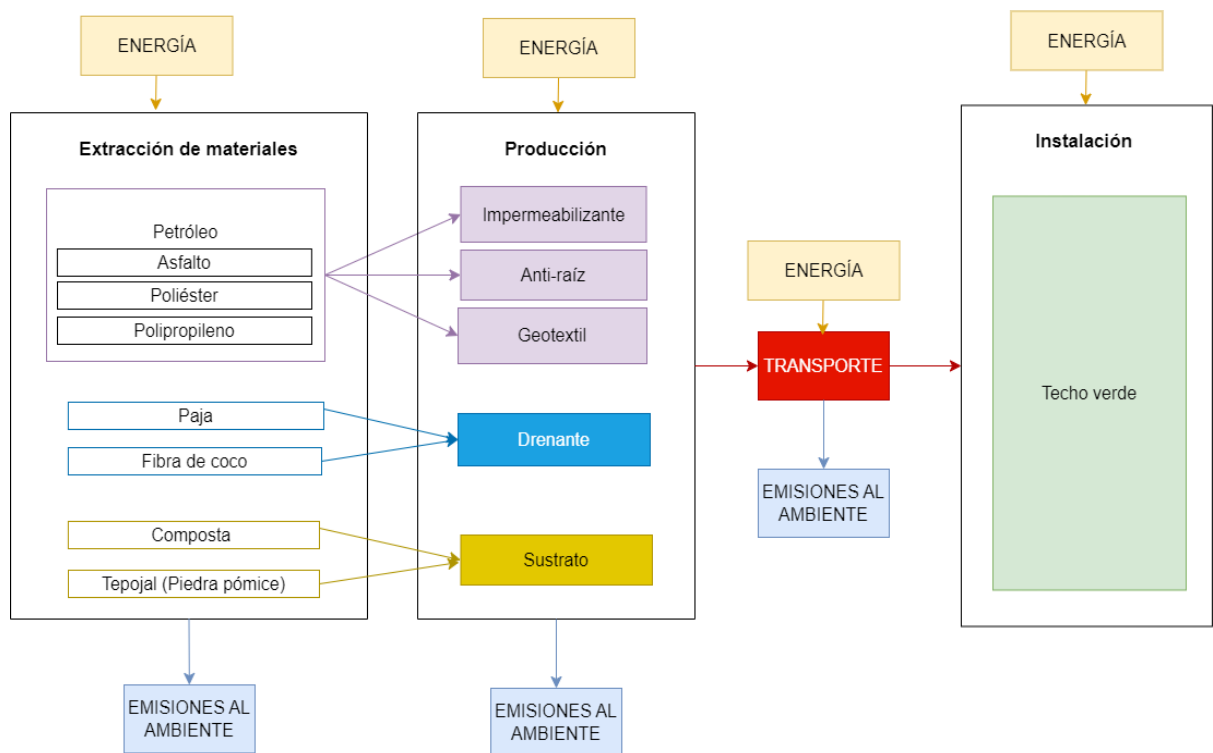


Figura 8. Diagrama de flujo simplificado del ciclo de vida del TVLE

$$\%Disminución = \frac{Huella\ de\ carbono\ TVC - Huella\ de\ carbono\ TVLE}{Huella\ de\ carbono\ TVC} \times 100$$

[6]

4.3.5 Impacto a la temperatura: absorción de radiación solar (RS)

En primera instancia se midió la cobertura vegetal de cada especie según la superficie en el año de instalación 2022 y dos años después en el TVLE. Con los datos obtenidos se podrá evaluar su rendimiento en términos de las características del sitio, las condiciones climáticas y las características de la estructura para el desarrollo propicio de la vegetación.

Estimar la cobertura vegetal servirá también para evaluar su relación con la capacidad del TVLE para impactar en la temperatura ambiental, mejorar la calidad del aire y reducir la huella de carbono.

La medición de la RS proporciona información cuantitativa sobre la cantidad de energía solar que llega a la superficie, permite evaluar la eficacia del TVLE en la absorción y reflexión de la energía solar, lo que genera la reducción del efecto ICU y la mejora del microclima local. Para llevar a cabo esto se empleó un dispositivo de medición de energía solar SM206-SOLAR con una ventana fotosensible. Con el fin de obtener mediciones representativas de la RS en el área, el dispositivo se colocó en cada uno de los centros de las siete secciones del TVLE según el tipo de vegetación que lo cubre (Figura 9), así como el área sin vegetación (ASV) considerada como techo desnudo.



- *S. dendroideum* — *S. nussbamerianum* — *Echeveria agavoides*
- *S. rubrotinctum* — *Graptopetalum paraguayense*
- *S. pachyphyllum* — *Echeveria elegans*

Figura 9. Disposición de las especies de flora en el TVLE

Posteriormente se realiza la estimación del ahorro energético (Q_e) por la atenuación de la RS, para representar la disminución en la demanda de energía para climatización por menor ganancia térmica, se considera en este caso el enfriamiento por medio de aire acondicionado. Seguido de esto se estima el ahorro energético anual, a través del calculo por cada temporada, secas y lluvias, al multiplicar por 180 días.

Aunado a esto, con las fórmulas 7-11, se lleva a cabo la estimación de la temperatura superficial (T_s) y ambiental (T_{amb}) a partir de la RS, se basa en la relación entre esta y el incremento térmico superficial, siguiendo modelos en donde se consideran ganancias térmicas evitadas gracias al efecto de aislamiento y enfriamiento pasivo del techo verde (Bollman et al., 2021; Qiu et al., 2013; Weng et al., 2004). La fórmula fue empleada con base a la diferencia porcentual de la RS entre la ASV y cada especie, se asume que la vegetación atenúa la RS y genera una reducción térmica, esto en proporción según los factores de 5 para T_s y 0.45

para T_{amb} , de acuerdo con estudios de sensibilidad térmica y aproximaciones empíricas (Sailor, 2008; Santamouris, 2014). Con estos datos, además es posible calcular el ahorro energético anual por especie (A_{ES}).

$$T_s = \left(\frac{RS_{ASV} - RS_{especie}}{RS_{ASV}} \right) * 5 \quad [7]$$

$$T_{amb} = \left(\frac{RS_{ASV} - RS_{especie}}{RS_{ASV}} \right) * 0.45 \quad [8]$$

$$RS_{ASV} = RS \text{ de la ASV}$$

$$RS_{especie} = RS \text{ de cada especie}$$

$$Q_e = t * A * RS_d \quad [9]$$

t = tiempo de incidencia solar diaria

A = superficie TVLE (m^2)

$$RS_d = RS_{ASV} - RS_{especiepromedio} \quad [10]$$

$$A_{ES} = \left(\frac{S_e}{S_T} \right) * Q_{eannual} * DifT \quad [11]$$

S_e = Superficie de cada especie (m^2)

S_T = Superficie total TVLE (m^2)

4.3.6 Análisis de decisiones multicriterio en Sistema de Información Geográfica (SIG)

El análisis de decisiones multicriterio (ADM) integrado con los SIG es un enfoque para la planificación e implementación de techos verdes. Algunas de las aplicaciones del ADM basado en SIG proporciona un marco integral para evaluar las compensaciones entre diferentes opciones de techos verdes (Ghorbanzadeh et al., 2018; Greene et al., 2011). En Oslo, se desarrolló una aplicación web que utiliza ADM basado en SIG para priorizar áreas para la modernización de techos verdes. Esta herramienta ayuda a las partes interesadas, como diseñadores y propietarios de edificios, a evaluar la importancia de los servicios ecosistémicos como la

regulación de la temperatura, la gestión de aguas pluviales y la biodiversidad (Teotónio, Cruz, et al., 2020).

De igual forma este método se puede aplicar como apoyo a la toma de decisiones para inversiones, un estudio en Lisboa evaluó las diversas opciones de techos verdes basadas en un análisis de costo beneficio (ACB). A partir de este enfoque se selecciono el tipo de techo verde adecuado al considerar las diversas preferencias de las partes interesadas y optimizar las decisiones de planificación urbana (Teotónio, Cabral, et al., 2020).

Asimismo, el método permite una orientación espacial eficiente de los techos verdes, alineando los beneficios ambientales con los objetivos de desarrollo urbano (Aguiar et al., 2020; Venter et al., 2021). Además, facilita la inclusión de diversas preferencias de las partes interesadas, lo que garantiza que las soluciones seleccionadas satisfagan las necesidades de varios grupos de interés (Greene et al., 2011; Venter et al., 2021).

La integración de estos criterios en el ADM proporciona una visión holística y estratégica, permitiendo priorizar las áreas que maximicen los beneficios ambientales y sociales. Este enfoque identifica las zonas adecuadas para la instalación de techos verdes, también orienta la toma de decisiones en materia de políticas públicas y planificación urbana, lo cual asegura una distribución equitativa y eficiente de los recursos. Con la implementación de techos verdes en las zonas seleccionadas, se espera adaptar la CDMX a los efectos del cambio climático.

En este trabajo, el ADM se estableció un período de 2020 a 2024 y cinco tipos de conjuntos de datos. El primero la contaminación del aire, identificará áreas con mayor necesidad de mitigación de contaminantes atmosféricos. El siguiente son los índices sociales: la densidad de población, las carreteras y el tipo de cobertura del suelo, permiten identificar áreas con alta presión demográfica y urbanización acelerada. Después, el NDVI mide la cobertura vegetal y destaca áreas con déficit de espacios verdes.

Los siguientes datos es la clasificación del uso del suelo, que distingue áreas urbanas, suburbanas y rurales, y permite identificar espacios disponibles para intervenciones. Por último la temperatura de la superficie terrestre (TST) que señala puntos críticos de ICU donde los techos verdes podrían contribuir a reducir temperaturas.

Respecto a la contaminación del aire, las concentraciones medias de NO₂, CO y O₃ de los productos Sentinel 5P de Google Earth Engine (GEE). La concentración de la columna vertical troposférica de los datos fuera de línea de nivel 3 del instrumento Monitoreo Troposférica (TROPOMI) se adquirió para el mapeo. Contiene bandas espectrales de ultravioleta-visible (270 – 495 nm), infrarrojo cercano (675 – 775 nm) e infrarrojo de onda corta (2305 – 2385 nm). Los productos Sentinel-5P se derivaron con una resolución espacial de 1,11 km de la plataforma GEE. Los datos de contaminación del aire de la CDMX se procesaron dentro de la plataforma GEE y las imágenes descargadas se remuestrearon a una resolución de 10 m en el SIG.

En términos de los índices sociales, se emplearon datos de población de cada límite urbano y rural (Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil, 2021) , las (Instituto Mexicano del Transporte & Secretaría de Infraestructura, 2024). Por otro lado, la clasificación de la cobertura del suelo en áreas construidas urbanas, suburbanas y rurales, terrenos abiertos urbanos, capturados y rurales (UN Habitat, 2014), por último se calcula la densidad de población con la fórmula 12.

$$\text{Densidad de población} = \frac{\text{Población total en una región}}{\text{Área de la región [km}^2\text{]}} \quad [12]$$

Para los datos del NDVI, se descargaron del satélite Sentinel-2 con menos del 5% de cobertura nubosa para marzo de 2024, con el fin de evitar el posible impacto de la precipitación en el análisis. La corrección radiométrica, incluyendo ajustes atmosféricos y topográficos, se realizó mediante el software ENVI 5.3 (Frantz et al., 2019). Posteriormente, todas las bandas espectrales fueron remuestreadas a una resolución espacial de 10 metros.

El patrón fenológico de la CDMX se evaluó mediante el método de fraccionamiento espectral, empleando el NDVI útil para clasificar y cuantificar diferentes tipos de cobertura vegetal (Aryal et al., 2022), con la fórmula 13.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad [13]$$

donde las regiones del espectro NIR y *RED* corresponden a las bandas B8 y B4 de Sentinel-2A/B, respectivamente (Nomura & Oki, 2021). Los valores del NDVI varían de -1 a +1, dependiendo de la cantidad de cobertura vegetal presente en la región analizada.

Los datos de TST se obtuvieron a partir de imágenes Landsat-8 descargadas del portal EarthExplorer (United States Geological Survey (USGS), 2024). Se seleccionaron imágenes con menos del 0.06% de cobertura de nubes sobre la región de estudio. El cálculo de la TST siguió un proceso en seis fases: conversión de números digitales de la banda 10 del TIRS a radiancia en la parte superior de la atmósfera, derivación de la temperatura de brillo, estimación de la proporción de vegetación mediante el NDVI, cálculo de la emisividad superficial, y finalmente, la corrección de emisividad para obtener la LST en grados Celsius. Se utilizó exclusivamente la banda 10 del TIRS, siguiendo la recomendación del USGS por su menor error de calibración comparado con la banda 11 (Wang et al., 2015).

A partir de los cinco criterios descritos se calcula el índice de prioridad de instalación de techos verdes (IPTV) mediante una suma lineal ponderada de los criterios y se dividió por el número total de criterios; de acuerdo con la siguiente fórmula 14.

$$IPTV = \left(\sum_{j=1}^n W_j MF_j \right) / n \dots Z \quad [14]$$

Donde *n* es el número de parámetros considerados en el análisis, *W_j* es la ponderación del criterio *j*. El criterio *j* en este caso corresponde a cada uno de los criterios empleados calculada por medio del método AHP. Una función de pertenencia *MF_j* que evalúa el cumplimiento del criterio con las condiciones ideales para la implementación de techos verdes. El valor del puntaje de idoneidad de la cubierta verde varía entre 0 y 1, generando cinco zonas:

- Zona 1. Prioridad muy baja: 0.0 - 0.2
- Zona 2. Prioridad baja: 0.2 - 0.4
- Zona 3. Prioridad media: 0.4 - 0.6
- Zona 4. Prioridad alta: 0.6 - 0.8
- Zona 5. Prioridad muy alta: 0.8 - 1.0

En este trabajo se delimitan las zonas prioritarias 3, 4 y 5 para cruzar con el nivel de ingreso medio económico trimestral de la CDMX (\$50,000 a \$100,00) (Instituto de Planeación Democrática y Prospectiva (IPDP), 2022), lo que permite identificar áreas donde se podría realizar una inversión en infraestructura verde.

Posteriormente se seleccionan 20 sitios específicos dentro de cada zona, para un total de 60 ubicaciones, en los siguientes tipos de edificios: hospitales, centros comerciales, supermercados y mercados. Estos fueron seleccionados por la característica en común de que los techos de estas estructuras suelen ser espacios subutilizados o sin un uso específico. En general, los techos de este tipo de edificaciones permanecen vacíos o son empleados únicamente para alojar equipos como sistemas de aire acondicionado o antenas (Berardi et al., 2014; Carter & Keeler, 2008; Luckett, 2009).

También cuentan con un promedio de más de veinte años de construcción, están ubicados en zonas urbanas conectadas, facilita la instalación, el mantenimiento y el monitoreo. De manera particular estas estructuras suelen contar con techos amplios y planos que son óptimos para la implementación de sistemas de techos verdes (Rowe & Getter, 2006).

Aunado a lo anterior también tendría potenciales impactos sociales en el caso de los hospitales y centros de salud tienen un flujo constante de pacientes y personal que pueden aprovechar los techos verdes para mejorar la calidad del aire y proporcionar espacios aprovechados para la salud mental de los usuarios (Bratman et al., 2012). Por otro lado, los centros comerciales y deportivos atraen un flujo constante de personas, maximizando los beneficios a las comunidades que interactúan con estos espacios (Wolch et al., 2014).

A partir de estos datos, se elabora una herramienta visual y técnica para la toma de decisiones: un mapa integrado por las 60 ubicaciones seleccionadas y las zonas prioritarias 3, 4 y 5. Se incluye información sobre la superficie disponible en cada sitio, se estimará el potencial de impacto ambiental en la captura de CO₂.

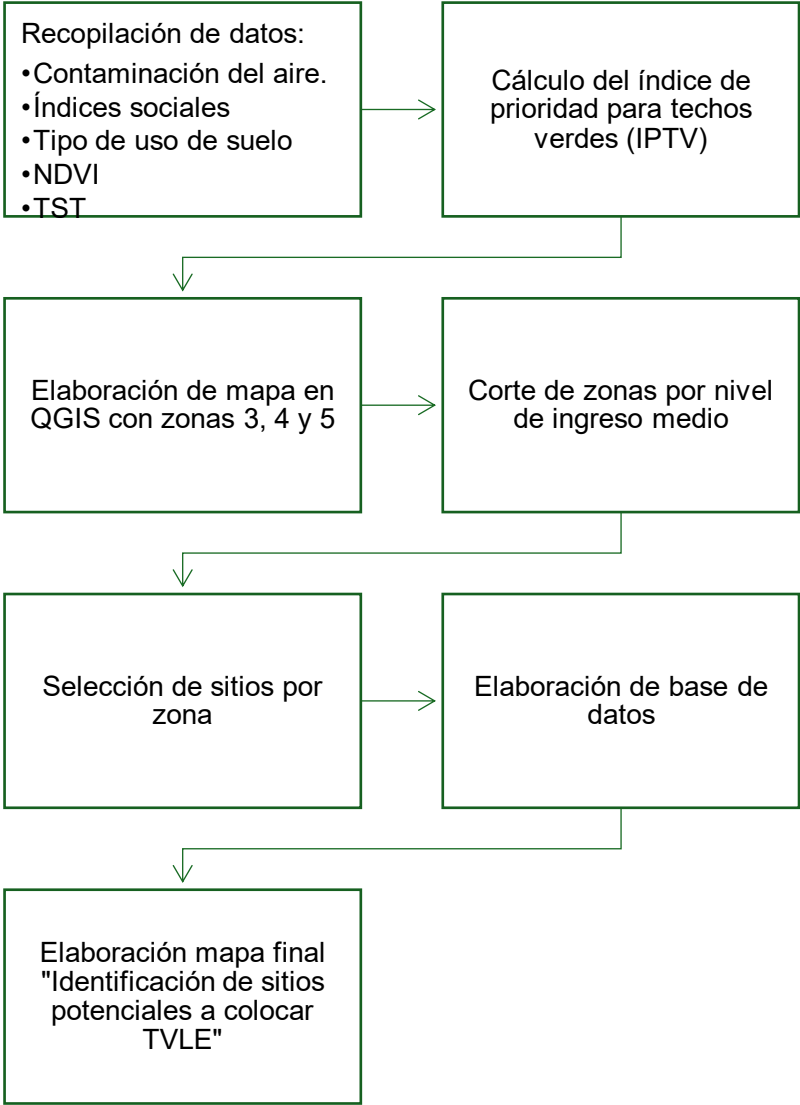


Figura 10. Flujo de trabajo para seleccionar sitios potenciales a implementar techos verdes en áreas prioritarias de la CDMX

4.4 Impacto Social de los techos verdes en la CDMX

Los techos verdes, como se ha mencionado, es la forma de reintegrar naturaleza en entornos urbanos, compactos y densamente poblados (Jim, 2013), con ello contribuyen a mitigar los efectos negativos del cambio climático, como el aumento de temperaturas y la pérdida de biodiversidad, aunado a esto generan un impacto significativo en la calidad de vida de los habitantes (Hunter et al., 2019). Al proporcionar espacios de esparcimiento, encuentro y conexión con la naturaleza en medio del ajetreo urbano, fomentan la cohesión social y la salud mental, (Rezaei et al., 2021) promoviendo así un sentido de comunidad y bienestar entre los ciudadanos (Yuliani et al., 2020).

El análisis del impacto social de los techos verdes permite identificar cómo estos proyectos pueden abordar desigualdades socioeconómicas y mejorar la equidad en el acceso a espacios verdes y sus beneficios (Panagopoulos et al., 2016). Al entender cómo los techos verdes afectan a diferentes grupos demográficos y comunidades dentro de CDMX, se pueden diseñar políticas y estrategias que garanticen una distribución de los beneficios de la sustentabilidad obtenidos a partir del techo verde (Bianchini & Hewage, 2012; Liberalesso et al., 2020). Este enfoque integral refuerza la noción de sustentabilidad no solo como una cuestión ambiental, sino como un pilar esencial para construir ciudades más justas, inclusivas y habitables en el futuro.

La instalación o no de los techos verdes depende de la perspectiva social (Keesstra et al., 2018), si pueden o no realizar actividades como el ejercicio, la socialización, el descanso y la relajación que también sería un beneficio a la salud física; asimismo, en esta investigación se tomará en cuenta los beneficios indirectos como la mejora al estado de ánimo (Williams et al., 2019).

4.4.1 Diseño y validación del instrumento cualitativo

Se eligió el uso de la entrevista semi estructurada como el instrumento cualitativo (Roulston, 2010) por su flexibilidad y capacidad para capturar una amplia gama de perspectivas, experiencias y opiniones en profundidad. Este tipo de entrevista combina elementos de estructura y apertura, lo cual permitirá seguir un guion predeterminado pero también explorar áreas relevantes que pueden surgir o no durante la conversación, de acuerdo con el objetivo de esta investigación (Wilson, 2014).

Para los métodos cualitativos, como la entrevista semi estructurada, la validez y confiabilidad no se aplica ya que esta proviene de lo expresado por los entrevistados,

especialmente cuando se busca reconstruir percepciones subjetivas y experiencias personales (Vela Peón, 2001). Otra perspectiva sobre la validez y confiabilidad las considera como resultado de la triangulación de comparar resultados obtenidos mediante la investigación con otras técnicas como entrevistas adicionales, análisis de las mismas entrevistas por otros investigadores y la validación por parte de los entrevistados.

Una tercera visión concibe la validez y confiabilidad como el resultado de tres criterios: la legitimidad del investigador (ya sea informal o formal), el uso adecuado de la técnica (incluyendo experiencia y entrenamiento) y la calidad de la relación establecida (Vela Peón, 2001).

La selección de la entrevista semi estructurada como instrumento cualitativo (Wilson, 2014) es para proporcionar un marco organizando manteniendo al mismo tiempo la adaptabilidad para explorar temas emergentes (Karanikola et al., 2016). El guion estructurado ofrece una base sólida para abordar los objetivos de la investigación (Tanggaard, 2009), asegurando que se cubran aspectos clave relacionados con la instalación y percepción de los techos verdes.

Al seguir un guion prediseñado, se pudieron hacer preguntas específicas a los responsables y usuarios sobre la motivación para instalar techos verdes, su comprensión de los beneficios ambientales, su experiencia en el espacio del techo verde y su opinión sobre su expansión.

La combinación de estructura y flexibilidad en la entrevista semi estructurada permite cumplir con el objetivo de la investigación, garantizando la recopilación de datos y detalles que permitan un análisis con el cual se brinda una comprensión completa de la experiencia y la percepción en relación con los techos verdes.

En este caso la entrevista semi estructurada se define como una conversación y situación construida con un propósito específico, por lo que la confiabilidad y validez dependen del proceso de preparación y ejecución de la entrevista. Se establecen los siguientes criterios para asegurar la legitimidad y calidad de la muestra y el proceso de la investigación para la recopilación de las respuestas y su posterior análisis.

- Legitimidad de la investigadora doctorante por el respaldo del IPN y se reconoce como experta en el tema, logrando el trabajo de campo a través de la vinculación con las autoridades responsables de cada sitio seleccionado. Esto incluye presentar los objetivos del proyecto y el marco institucional, así como la aceptación de participación

por parte de las personas a entrevistar.

- Empleo adecuado de la técnica de entrevista semi estructurada con una codificación abierta según los objetivos y significados emergentes para integrar la información con el marco conceptual desarrollado. Las entrevistas fueron grabadas, transcritas y codificadas.
- Se estableció un plan para llevar a cabo en 6 minutos cada entrevista por persona, pero sin limitarse más o menos tiempo. Dando un espacio para la extensión deseada a las respuestas permitiendo una profundización en puntos de vista, experiencias, entre otros aspectos. Los entrevistados dedicaron tiempo y atención para compartir experiencias significativas.

Se diseñó un guion de entrevista semi estructurada (A1 del Anexo 1), con la finalidad de analizar la percepción y experiencia de los “responsables” definidos, así como aquellas personas encargadas del techo verde y los “usuarios” los cuales dependiendo del techo verde podrán ser: estudiantes, profesores, trabajadores, visitantes locales y foráneos, para la aplicación a este último grupo se hace la aclaración de la duración máxima de 6 minutos para llevar a cabo la entrevista.

Las respuestas por obtener a partir de la aplicación de este instrumento a la población es la percepción en términos de vegetación, diseño y presencia en el paisaje, así como del conocimiento que se relaciona con la consciencia sobre los beneficios ambientales y opinión para el uso de este sistema de naturación como herramienta para la mejora del entorno urbano, así como la experiencia emocional al ver o convivir cerca de este espacio verde.

La finalidad de presentar el proyecto al inicio y mencionar la duración estimada de la entrevista, es para establecer una expectativa clara, a manera de fomentar la disposición y la apertura del entrevistado. Para ambas secciones se pretende explorar los beneficios ambientales percibidos e indagar sobre las emociones y percepciones personales asociadas con el techo verde, buscando comprender la conexión íntima del entrevistado con el espacio. Dirigiendo la entrevista a profundizar en la percepción personal, experiencia subjetiva y la recomendación o no sobre la expansión de techos verdes.

Respecto a las preguntas planteadas para los “Responsables” estas buscan explorar las motivaciones de la instalación del techo verde, ya sea por consideraciones ambientales, financieras o estéticas. Conocer el tiempo de experiencia contexto sobre el nivel de conocimiento del entrevistado en el campo, así como entender los cuidados necesarios y la complejidad del mantenimiento, para identificar posibles beneficios o problemas.

4.4.2 Aplicación de los instrumentos cualitativos

La aplicación de los instrumentos cualitativos implica un proceso el cual se inicia con la búsqueda activa de contactos con las personas, asociaciones, o empresas responsables de los techos verdes. Con esto se busca establecer un puente de comunicación, posteriormente, se procede a presentar las generalidades del proyecto contextualizando la relevancia de llevar a cabo el trabajo de campo en estos sitios. El siguiente paso es formalizar el convenio mediante el envío de un oficio institucional solicitando la autorización para realizar las actividades diseñadas con el objetivo de la recopilación de datos cualitativos. Una vez con el permiso, se procede a agendar visitas para la aplicación del instrumento cualitativo, las entrevistas semiestructuradas.

Este documento fue presentado a las autoridades correspondientes en el momento de vinculación y solicitud del permiso de trabajo, una vez acordadas las condiciones según cada caso se procedió a seguir los pasos como lo fueron: presentación de oficios, completar documentación de uso de datos e información y programar visitas para la aplicación de entrevistas.

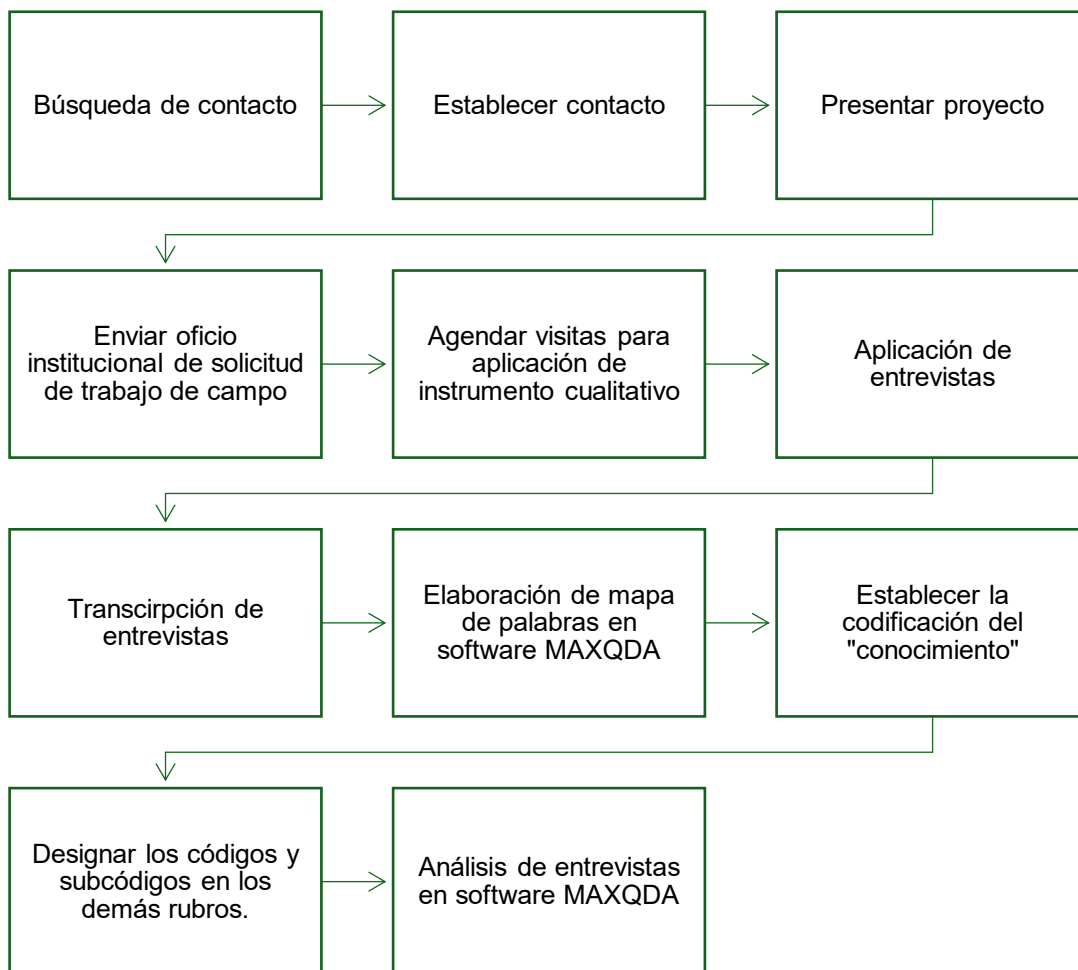


Figura 11. Metodología cualitativa del análisis del impacto social

4.5 Evaluación económica del TVLE en la CDMX

4.5.1 Análisis costo – beneficio (ACB)

El análisis de costo-beneficio (ACB) es una herramienta económica que evalúa la viabilidad de un proyecto, comparando sus costos y beneficios en términos monetarios (Abelson, 2020; Nahler, 2009). El ACB incluye beneficios tangibles expresados en términos monetarios, como materiales y mantenimiento y también como los intangibles tales como impacto ambiental, salud, bienestar social (Carolus et al., 2018) e influyen en la creación de políticas ambientales (Pearce, 1998).

El costo evitado (CE) representa el gasto que no se realiza debido a una acción o intervención en particular (Vogt-Schilb et al., 2018). En el ámbito energético se refiere a aquellos costos que una empresa evita por emplear energía provenientes de fuentes alternativas (Kamal et al., 2019; Lu et al., 2021). También estima la prevención de impactos negativos (Hochman & Appasamy, 2024), como en el caso de los techos verdes con la reducción de uso de equipos de climatización y la disminución de ICU (Mutani & Todeschi, 2020).

En este trabajo, en función de lo obtenido en el 4.3.5, se calculan el CE que será el ahorro energético derivado de la radiación solar absorbida (Huang et al., 2023) por el TVLE.

Para ello se requiere la tarifa eléctrica, la cual se consultan los datos oficiales de la Comisión Federal de Electricidad, para este cálculo se empleó una tarifa promedio representativa basada en el análisis de los rangos de consumo y el tipo de inmueble, ya que se calculará para aquellos sitios potenciales a tener un techo verde. Las consideraciones para este cálculo son a partir del uso del aire acondicionado su costo económico diario (CD-AC) \$10 (diez pesos mexicanos) y 8.33kWh/día es el consumo energético promedio (CEP-AC), la relación de estos es \$1.20kWh siendo el costo estimado (CEsAC). Estos datos son aplicados en las fórmulas 15 y 16 para calcular el CE anual, de la siguiente forma:

$$CE = CesAC * QeA \quad [15]$$

$$QeA = \text{ahorro energético anual} = Q_{\text{elluvia}} + Q_{\text{secas}} \text{ (kWh)} \quad [16]$$

Enseguida se calcula el Valor Presente Neto (VPN), calculado según las fórmulas 17 y 18, que compara los flujos de costos y beneficios a lo largo del tiempo, considerando una tasa de descuento que indica una disminución del valor del dinero. El VPN representa el valor temporal del dinero, es la diferencia entre los valores actuales de las entradas y salidas de efectivo a lo largo del tiempo (Wetekamp, 2011). Ayuda a evaluar teóricamente los proyectos de inversión y con ello predecir los ingresos esperados considerando el valor actual del dinero (Drozdowski & Dziekański, 2022; Shou, 2022).

El ACB se utiliza también en proyectos para la implementación de SbN, se emplea para justificar la inversión, así como para compararlo con otras alternativas, ya que diversos beneficios no son inmediatamente perceptibles pero generan valor a largo plazo. Los resultados del ACB ayudan a la toma de decisiones sobre qué alternativa es más eficiente económicamente, ya que considera el VPN que contiene todos los flujos y proporciona un indicador de la contribución de la inversión (Drozdowski & Dziekański, 2022).

$$VPN = \frac{\sum(C_E - C_T)}{(1+r)^t} \quad [17]$$

$r = \text{tasa de descuento} = 5\%$
 $t = 40 \text{ años}$

$$\text{CostoBeneficio} = \frac{VPN}{C_T} \quad [18]$$

$C_T = \text{costos totales} = \text{costos iniciales} (\$)$

Posteriormente se calcula el período de recuperación (PR) para estimar cuántos años se requieren para que el ahorro energético generado por el techo verde compense su inversión inicial.

$$PR = C_T / QeA \quad [19]$$

Seguido se realiza la estimación de ahorros económicos (A_{ES}) con las fórmulas 20 y 21 para cada sección del TVLE, se seleccionan aquellos con mejor rendimiento ambiental y económico para la proyección de su implementación en los 60 sitios

potenciales a colocar TVLE derivados del 4.3.6, para ello se definiran la tarifa de CFE aplicable a cada tipo de instalación. Se calcula el ahorro económico por superficie anualmente

$$A_{ES} = Qe_{especie} * Tc_{sitio} \quad [20]$$

$$Tc = Tarifa\ eléctrica\ (\$MXN/kWh) \quad [21]$$

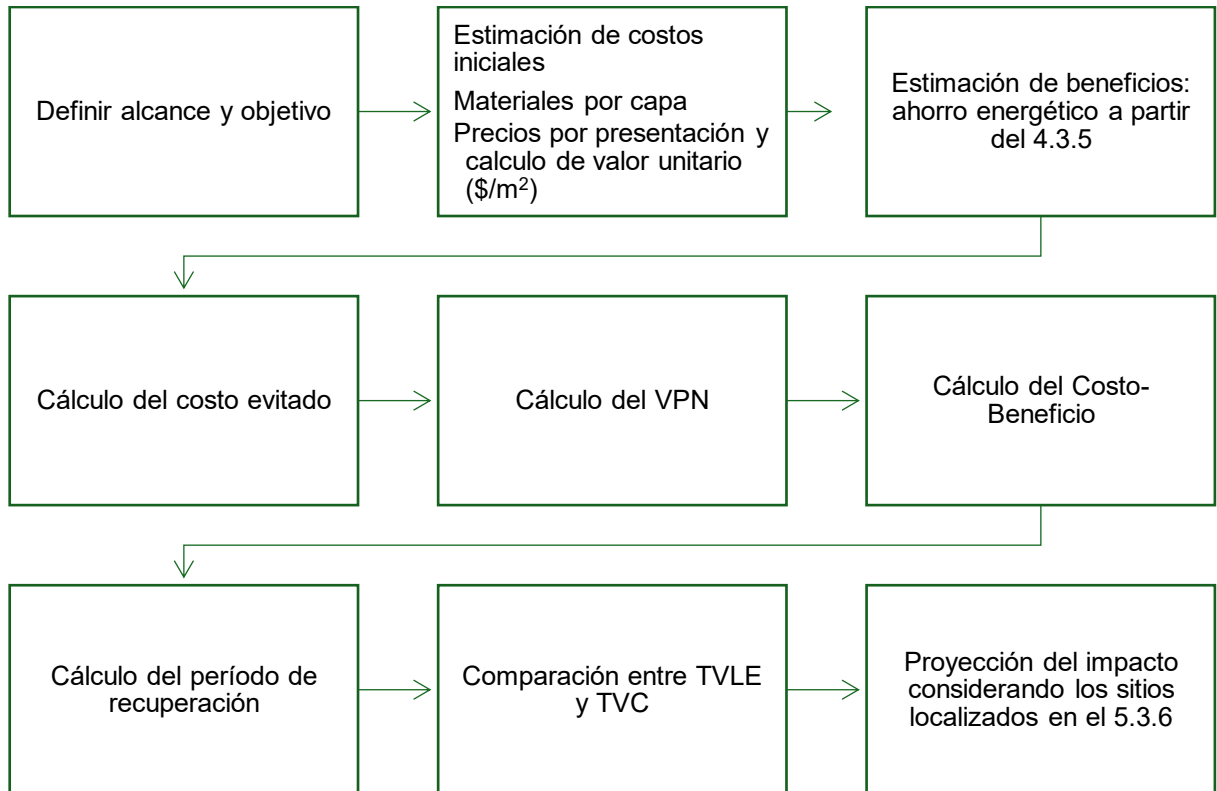


Figura 12. Proceso para el cálculo del ACB

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Impacto ambiental

5.1.1 Inventario de techos verdes de la CDMX

A la fecha no existía un inventario de techos verdes de la CDMX, por lo que de acuerdo con el punto 4.3.1 de la metodología se desarrolló un mapa que representa aquellas superficies de techos verdes que no eran consideradas en el inventario de áreas verdes de la SEDEMA, así como nuevas ubicaciones que se han desarrollado con este sistema después del 2017 (Tabla A1 del Anexo 1)

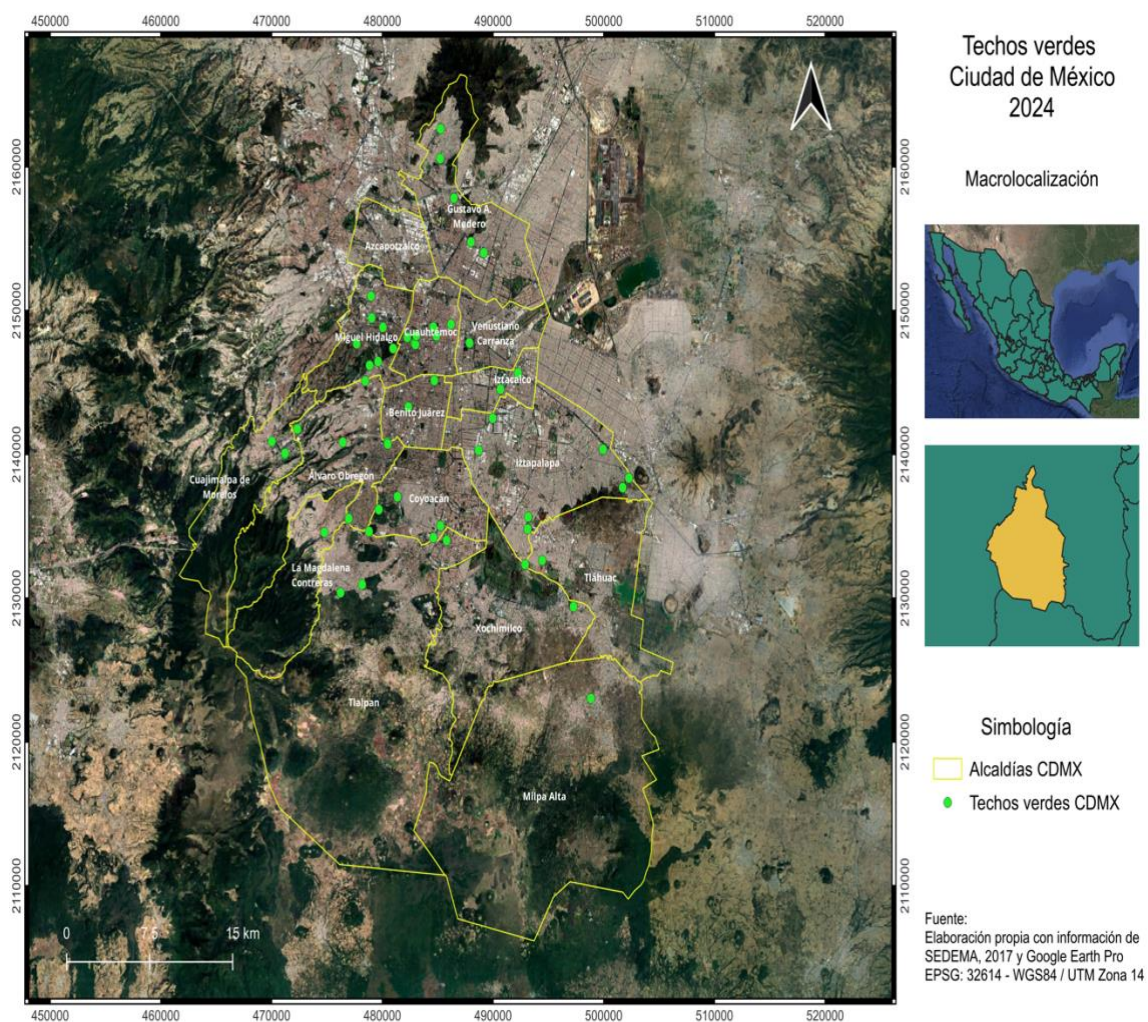


Figura 13. Mapa inventario de techos verdes en la CDMX

Con esta información se recalculó una superficie total de 79,584.25m² por techos verdes en 56 ubicaciones lo cual corresponde a un 0.0053% del total de la superficie de la capital del país, un aproximado de 11 campos de fútbol de tamaño promedio (105m x 68m) (Federación Internacional de Fútbol Asociación (FIFA), 2021). Esta base de datos también incluye información sobre el año aproximado de instalación y el tipo de techo verde, del total el 63% son del tipo extensivo, el 23% intensivo y el 14% semi-intensivo (Anexo 2).

Asimismo, al estimar el año de instalación de cada uno de estos sistemas, se realizó un análisis de periodicidad en el que se observa un aumento en la adopción de techos verdes en la CDMX a lo largo de las últimas dos décadas. Según el concepto manejado en esta investigación, se puede definir como techo verde intensivo a las históricas Terrazas de Alcázar en el Museo Nacional de Historia – Castillo de Chapultepec, establecido como tal en 1944.

A pesar de ello, este estudio considera el primer techo verde en la CDMX establecido en 1999, marcando un hito en esta práctica, en Ciudad Universitaria, por lo cual se establece como uno de los techos verdes de estudio para esta investigación.



Figura 14. Terrazas del Alcázar.

Fuente: Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), 2020

De acuerdo con la Figura 15 sobre la evolución de la instalación de techos verdes muestra cierta variabilidad a lo largo de los años. Entre 2007 y 2016, se observa un aumento en la instalación de techos verdes, con un crecimiento progresivo, pasando de 4 en 2007 a 8 en 2008 y manteniéndose en cifras relativamente altas hasta 2016. Después de 2016, se aprecia cierta estabilización en la instalación, con números que fluctúan, pero no muestran un crecimiento significativo.

Entre los 2017 a 2019, hay una disminución en el número de instalaciones, seguido de un ligero repunte en 2021 y 2022, aunque no alcanza los números previamente observados en el periodo entre 2007 y 2016. El desarrollo de la instalación de estos sistemas de naturación ha sido inconstante en la CDMX, en el año 2022 se estableció en el Parque La Mexicana (PLM), según los datos obtenidos en este estudio es el techo verde extensivo más grande de la capital del país, por ello se eligió como uno de los sitios a estudiar y se describirá en el punto 5.1.2.

En términos de localización, según la Figura 16, la cantidad de techos verdes en las alcaldías de la CDMX muestra una variabilidad en su distribución. Las primeras tres alcaldías son: Cuajimalpa de Morelos, Álvaro Obregón y Miguel Hidalgo, con un 23.19%, 17.02% y 13.96%, respectivamente.

Por otro lado, hay alcaldías con porcentajes más bajos de techos verdes, como Benito Juárez con un 0.20% y La Magdalena Contreras con un 0.09%. Este análisis revela una disparidad en la distribución de techos verdes entre las distintas alcaldías. Algunas tienen una adopción más alta de techos verdes, lo que sugiere un enfoque en la implementación de este tipo de herramienta para la adaptación al cambio climático. Mientras que aquellas alcaldías con porcentajes bajos, podría señalar una menor atención o inversión en este tipo de infraestructuras.

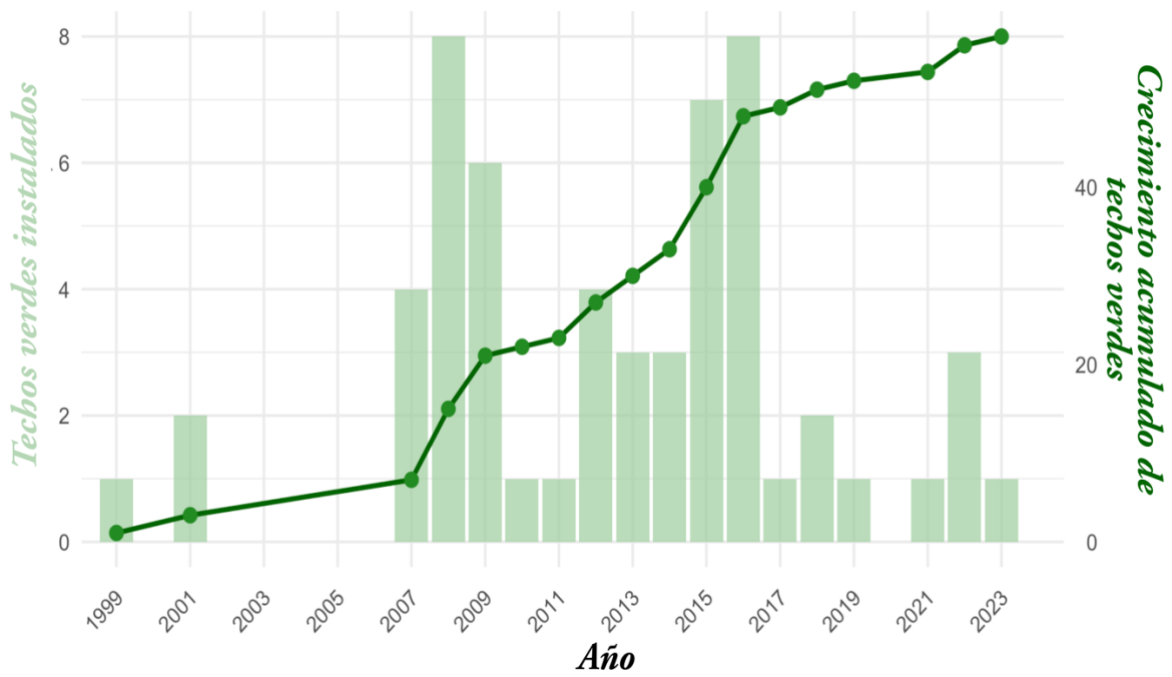


Figura 15. Evolución de techos verdes en la CDMX (1999–2023)

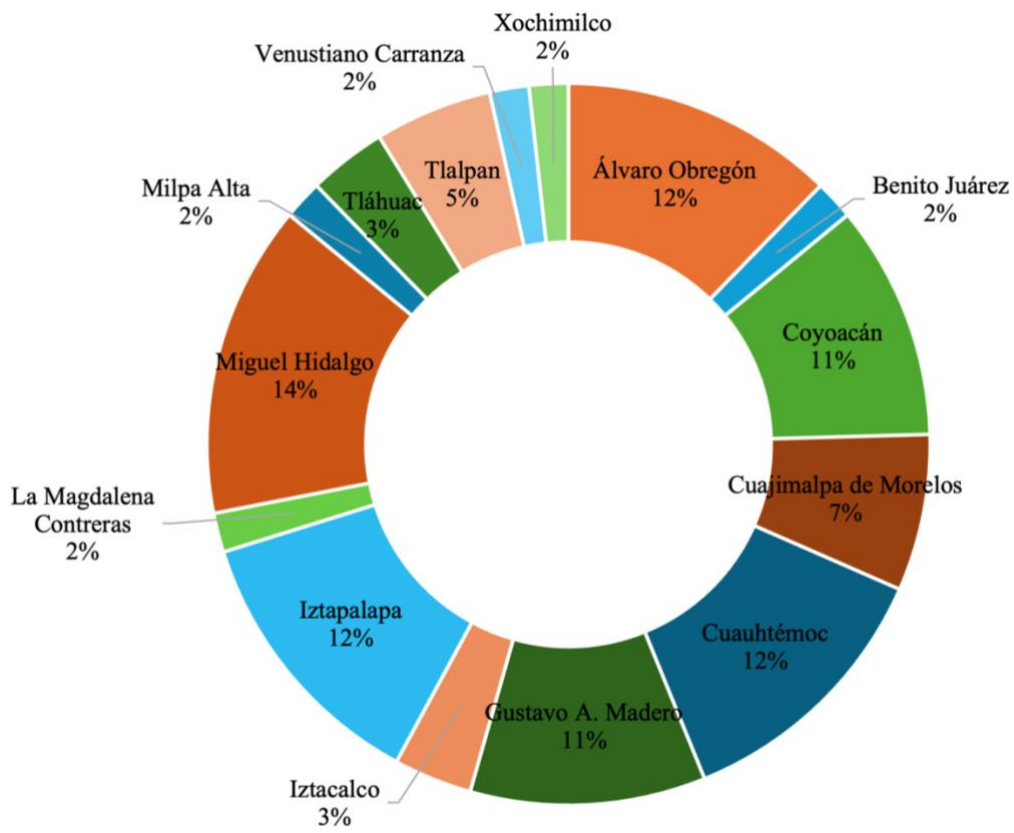


Figura 16. Desarrollo de techos verdes por alcaldía

Los datos referentes al área de los techos verdes fueron comparados con una de las metas planteadas en el "Plan Verde", un documento estratégico integral con una visión hacia la sustentabilidad (Gobierno del Distrito Federal, 2007), en el que se proponía la instalación anual de 10,000m² de techos verdes de manera anual entre 2007 y 2018, con una superficie meta estimada total de 120,000m². A partir de esta referencia, se calcula que al cierre de 2018 la meta se cumplió en un 58.55%.

Si se considera la tendencia histórica de crecimiento sostenido, con un total de 79,584.25 m² de techos verdes en los últimos 24 años, lo que representa cerca del 47.7% de la cobertura total proyectada según la meta planteada, bajo este ritmo de expansión, se estima que la meta original se alcanzaría alrededor del año 2028.

Esta comparación facilita la valoración del progreso vigente en relación con un instrumento de planificación pública, como un marco para examinar el efecto y desarrollo de esta SbN. Por lo tanto, se utilizaron los datos recopilados para analizar la calidad de la vegetación (MSAVI) de los techos verdes y su conexión con variables climáticas, y la estimación de la captación de CO₂.

5.1.2 Análisis de la calidad de vegetación y captación de CO₂ mediante MSAVI

Para analizar los beneficios ambientales asociados a los techos verdes identificados en el punto 5.1.1, se creó una base de datos visual en formato .kml en GEP, a partir de la generación de 385 gráficas con resultados de MSAVI y climatología de la plataforma CM (Anexo 2).

La base de datos visual incluye cinco gráficas para cada uno de los techos verdes sobre la relación entre el índice MSAVI y las precipitaciones a lo largo del período de 2019 al 2023. El sexto gráfico que conjunta todos los años, el promedio del índice MSAVI y de la precipitación. Por último, el séptimo gráfico de tendencia climáticas con las temperaturas mínimas y máximas (°C) y el índice MSAVI. También de la plataforma CM se obtuvieron 286 imágenes con el índice MSAVI de temporada de lluvias y de secas del año 2023, mismas que se agregaron a la base de datos.

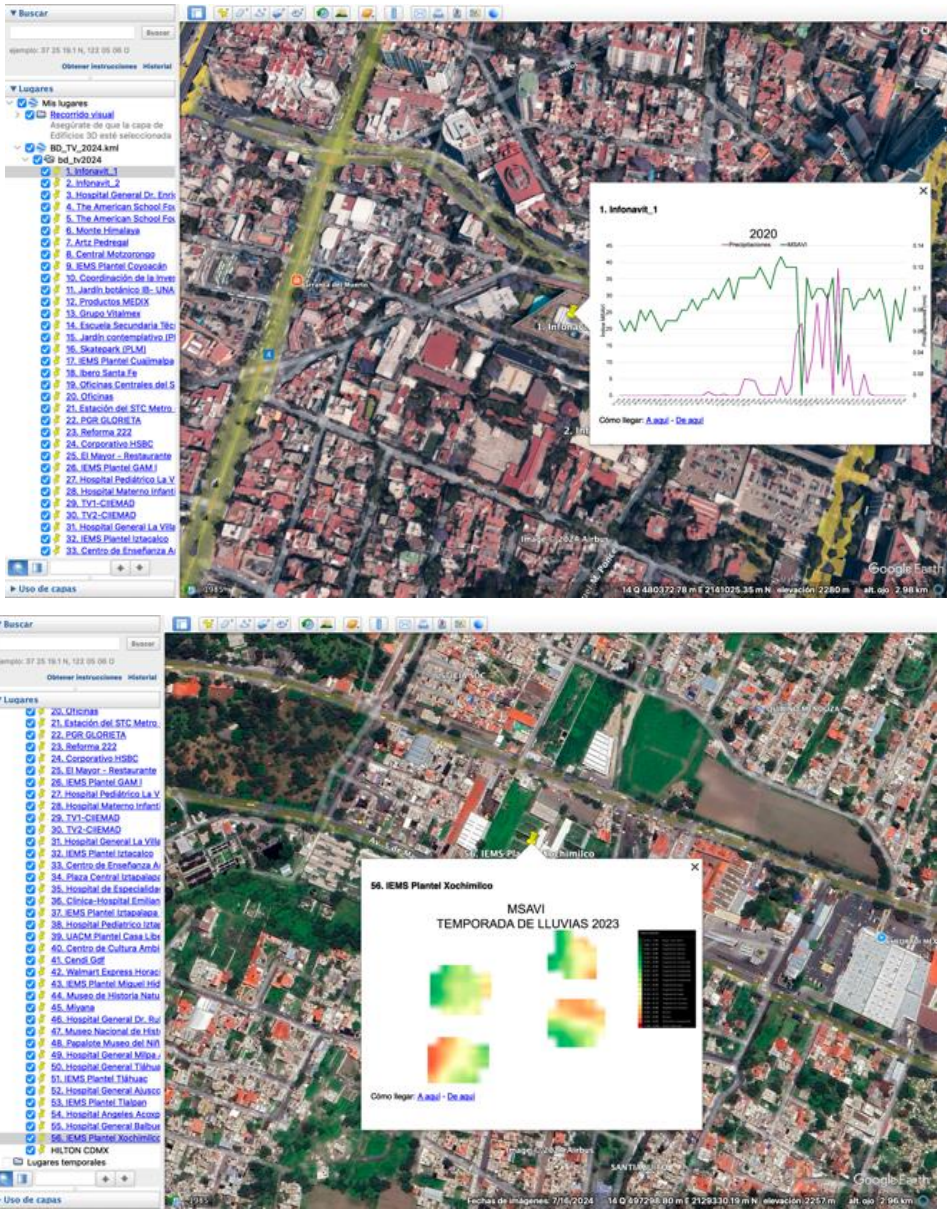


Figura 17. Ejemplo de la base de datos visual del inventario de techos verdes (Anexo 2).

A continuación, se presentan el análisis cuali-cuantitativo siguiendo la Figura 6 con la escala de colores del índice MSAVI, de los techos verdes de estudio. En la Figura 18 se presentan las imágenes del índice MSAVI en temporada de lluvias y de secas, de los primeros cinco techos verdes de estudio. Debido a las dimensiones reducidas de los TVLE, presentan limitaciones en la resolución y representación visual, interpretado como áreas únicamente con brotes de vegetación.

En el techo verde ID 1 durante la temporada de lluvias la vegetación densa se concentra principalmente en el perímetro inferior izquierdo del área, mientras que la vegetación baja se encuentra en su mayoría en las proximidades de la pista de atletismo. Durante la temporada de secas, la vegetación muestra una disminución con categorías de escasa a baja. En ambas estaciones, el área correspondiente al techo de los sanitarios ubicados en este espacio se identifica como suelo desnudo, alrededor del cual se observa una cobertura de vegetación escasa.

El techo verde ID 4, durante la temporada de lluvias presenta una transición de vegetación densa a escasa, comenzando desde la esquina inferior derecha hacia el centro y el borde superior. Sin embargo, en temporada de secas, la calidad de vegetación disminuye. Solo una sexta parte del área conserva vegetación moderada mientras que el resto se degrada progresivamente pasando por vegetación baja, escasa e incluso áreas con brotes.

El techo verde ID 5, en la temporada de lluvias, tiene una fracción de vegetación moderada en la parte superior, mientras que el resto del espacio se caracteriza de vegetación escasa y baja. Durante la temporada de secas, toda el área presenta únicamente vegetación escasa, lo que podría significar un impacto estacional en la cobertura vegetal.

El techo verde ID 11 muestra una cobertura de vegetación densa en la temporada de lluvias. Sin embargo, en la temporada de secas, la calidad de la vegetación disminuye, con una sexta parte del área con vegetación moderada, mientras que el resto pasa de vegetación baja a principios de vegetación escasa.

Por último en el techo verde ID 15, en la temporada de lluvias, casi en la totalidad de su área se encuentra cubierta por vegetación densa. A pesar de esto, en temporada de secas, únicamente en una sexta parte del espacio conserva esta categoría, el resto tiene característica de vegetación moderada. Las áreas identificadas como suelo desnudo corresponden a la oficina de mantenimiento del sitio.

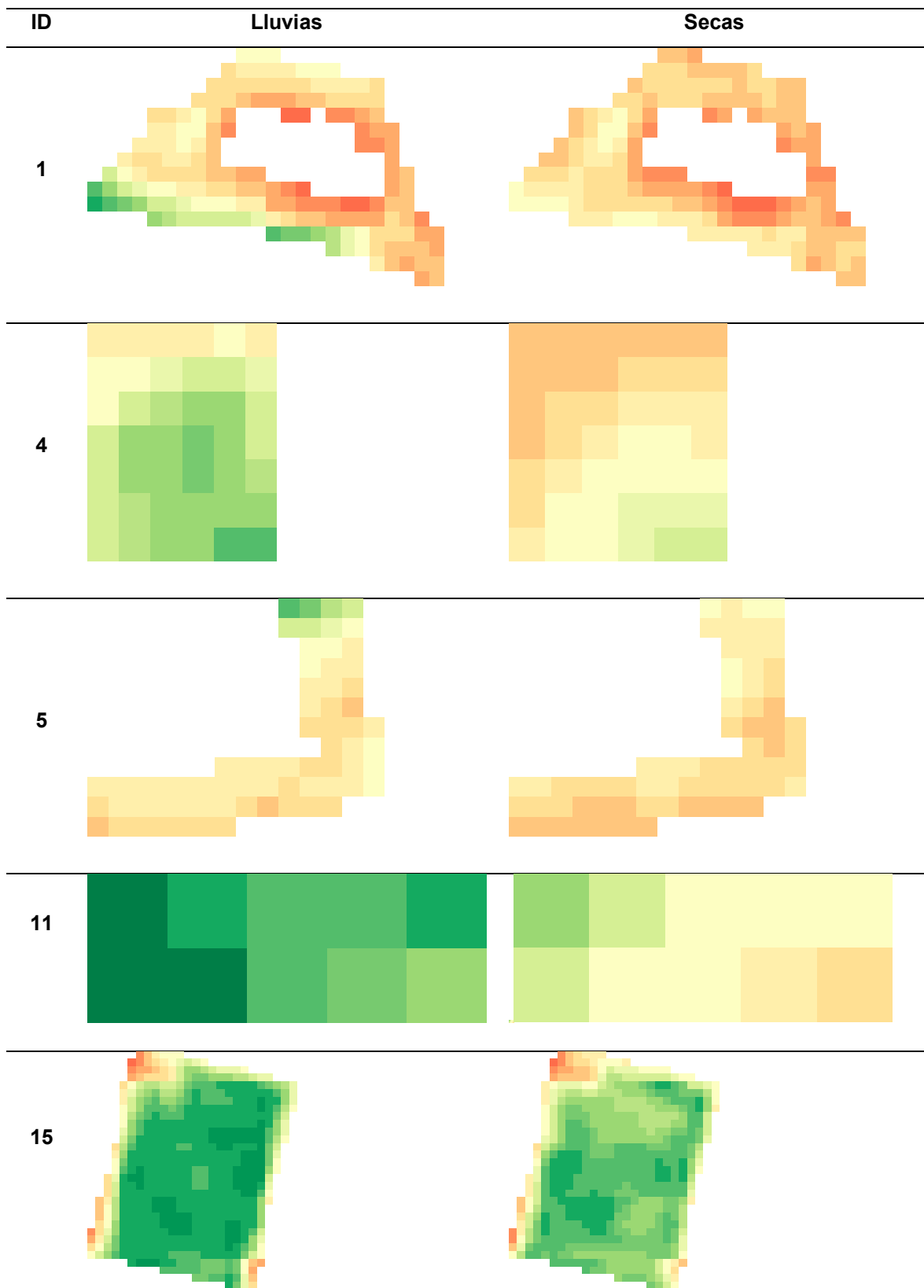


Figura 18. Índice MSAVI en temporada de lluvias y de secas de los techos verde de estudio

Lo descrito anteriormente permite determinar que los techos verdes de menor tamaño, tienden a mostrar patrones como brotes dispersos, lo que podría reflejar limitaciones inherentes a sus dimensiones y a las condiciones climáticas estacionales. Los techos verdes con mayor cobertura vegetal se identifican en temporada de lluvias estos experimentan una reducción de su calidad en temporada de secas, posiblemente por la influencia de falta de precipitaciones.

Estos resultados ponend de manifiesto la importancia de considerar factores como el diseño, el mantenimiento y el tamaño de los techos verdes dentro de la planeación y gestión de la IVU, ya que estos determinan su desempeño y función como herramienta sustentable para la adaptación al cambio climático. Sin embargo, el análisis cualitativo está limitado por la escala de representación visual y las características específicas de los techos estudiados, por lo que se complementa con los siguientes resultados cuantitativos.

Según la Tabla 9, que presenta el índice MSAVI, los TVLE del CIIEMAD, describen a la vegetación como brotes lo cual también podría estar relacionado a las dimensiones ya que son los de menor área. El índice MSAVI de los cinco techos verdes restantes (ID: 1, 4, 5, 11 y 15) presentan vegetación de escasa a vegetación moderada. El valor más alto en este grupo de resultados coincide con el techo verde con mayor tiempo de instalación ubicado en el Jardín botánico del Instituto de Biología (JB-IB), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) seguido del techo verde extensivo más grande del estudio.

Tabla 9. Promedio del índice MSAVI de los techos verdes de estudio

ID	Techo verde	Tipo de techo verde	MSAVI Promedio
1	Oficinas del Infonavit.	Intensivo	0.0961
4	AFS - FAC	Semi-Intensivo	0.1119
5	AFS - WEC	Extensivo	0.1062
11	JB-IB. UNAM	Extensivo	0.2174
15	Jardín contemplativo. PLM	Extensivo	0.2029
29	TVLE CIIEMAD - 1	Extensivo	0.0281
30	TVLE CIIEMAD - 2	Extensivo	0.0320

El análisis de los techos verdes de estudio sobre su comportamiento en términos de correlación entre el índice MSAVI y el CO₂ capturado con diversas variables meteorológicas: precipitación, humedad relativa, temperatura máxima y mínima. En la Tabla 10 se incluyen los valores de correlación de Pearson calculados entre las variables mencionadas. Asimismo, se analizan las tendencias generales observadas en los datos, que proporciona una perspectiva de la relación entre la calidad de la vegetación y las condiciones climáticas.

El techo verde intensivo ID 1, tiene correlaciones bajas entre el índice MSAVI y las variables climáticas. La correlación con la temperatura mínima (0.3987) sugiere que las temperaturas nocturnas podrían influir ligeramente en la calidad de la vegetación. Sin embargo, el diseño intensivo con sistemas de riego mitigan la dependencia a la precipitación con una correlación positiva pero baja (0.2248).

El techo verde ID 4 presenta correlaciones positivas moderadas entre el índice MSAVI y las variables climáticas, siendo la mayor correlación con la humedad (0.1295). Su comportamiento refleja una interacción limitada con las precipitaciones y las temperaturas máximas, posiblemente debido al diseño semi-intensivo, que combina características de techos extensivos e intensivos.

Referente al techo verde extensivo ID 5 tiene correlaciones débiles y, en algunos casos, negativas entre el índice MSAVI y las variables climáticas, como la lluvia (-0.0605). Con una correlación positiva con la temperatura máxima (0.1685) que podría indicar un efecto moderado del calor por el tipo de vegetación.

En cambio el techo verde extensivo ID 11, el más antiguo de la muestra, presenta una correlación alta entre el índice MSAVI y la lluvia (0.4394), lo que sugiere una dependencia de la vegetación respecto a las precipitaciones. Sin embargo, las correlaciones negativas con la temperatura máxima (-0.1005) y mínima (-0.0308) indican que las condiciones térmicas podrían limitar su desempeño.

Acerca del techo verde ID 15, con la mayor superficie de la muestra y una instalación reciente, presenta correlaciones positivas significativas con la lluvia (0.4029) y la humedad relativa (0.4029), esto demuestra que tiene una capacidad para aprovechar las condiciones climáticas favorables. A pesar de ello, las correlaciones negativas con las temperaturas máximas (-0.1153) y mínimas (-0.2127) podrían evidenciar que aún se debe adaptar la vegetación al clima.

Respecto al TVLE CIEMAD - 1 con ID 29, tiene una correlación positiva moderada con la lluvia (0.2342) y la humedad relativa (0.2342), lo que indica que las condiciones climatológicas impactan en un buen desempeño de la vegetación. En tanto que, la correlación con la temperatura máxima es ligeramente negativa (-0.0664), sugiriendo que su capacidad térmica puede verse afectada por su tamaño.

Finalmente el TVLE ID 30, con correlaciones bajas o negativas con la mayoría de las variables climáticas, esto podría ser por su capacidad para mantener un microclima estable y soportar condiciones extremas. La única correlación alta fue la humedad (0.2563) que influye en la vegetación.

Tabla 10. Relación entre el índice MSAVI, captación de CO₂ y variables climáticas

ID	Correlación de Pearson								Tendencia		
	MSAVI				CO ₂				MSAVI- CO ₂	Lluvia- CO ₂	MSAVI- Lluvia
	Lluvia	Temp máx.	Temp mín.	Humedad	Lluvia	Temp máx.	Temp mín.	Humedad			
1	0.2248	0.2831	0.3987	0.1340	0.2248	0.3234	0.3564	0.0258	0.1100	2.5320	0.0944
4	0.1295	0.0981	0.1301	0.1295	-0.0013	0.0981	0.1301	0.1295	0.1100	2.0645	0.1119
5	-0.0605	0.1685	0.1639	-0.0605	0.1639	-0.1968	1.00	0.1685	0.1100	2.1025	0.1067
11	0.4394	-0.1005	-0.0308	0.4394	1.00	0.0504	1.00	-0.1005	0.2000	1.9687	0.2082
15	0.4029	-0.1153	-0.2127	0.4029	1.00	0.7743	1.00	-0.1153	0.2000	2.5511	0.1972
29	0.2342	-0.0664	-0.0509	0.2342	1.00	0.1226	1.00	-0.0665	0.0400	0.9106	0.0249
30	-0.0614	-0.1089	-0.0792	0.2563	0.9850	-0.0391	0.2039	0.4176	0.0321	0.1764	0.0323

Según los datos obtenidos, los techos verdes extensivos son más perceptibles a las variables climáticas (Nyuk Hien et al., 2007; Zhang et al., 2019), mientras que los techos verdes intensivos aparentemente son menos dependientes de las variables, esto podría ser explicado por su diseño con un espesor mayor de sustrato, así como su mantenimiento que considera el riego y la poda rigurosa (Gan et al., 2023; Lee & Jim, 2019, 2020).

En la mayoría de los techos verdes, los valores de correlación entre el índice MSAVI y la captación de CO₂ son bajos, lo que posiblemente indica que sin importar el tipo o tamaño la vegetación existente tiene limitaciones en este rubro. En cambio el techo verde ID 15, el más grande en la muestra, cuenta con una correlación ligeramente superior probablemente por la densidad y calidad de su vegetación.

El techo verde ID 11, con mayor tiempo de instalación, tiene valores constantes que podrían demostrar una madurez en su cobertura vegetal. Mientras que los más recientes muestran valores irregulares, probablemente por que la vegetación se puede encontrar en período de desarrollo y un posterior establecimiento.

Se estimaron los valores en promedio del CO₂ capturado por tipo de techo verde del inventario, así como los años y la superficie. Los datos generales de la captura de CO₂ se presenta en la Tabla A1 en el Anexo 1.

Tabla 9. Comparación de captura de CO₂

Tipo de techo verde	Años	Superficie (m ²)	Promedio		
			Captura de CO ₂		
			Kg/año	ppm/año* m ²	Kg/año*m ² acumulado
Semi-intensivo	12.55	677.3044	2.6174	0.0224	33.1303
Extensivo	11.73	1,519.3285	2.5817	0.0208	30.8295
Intensivo	10.154	1,678.6469	2.5977	0.0179	26.4498

En términos de captura de CO₂, los tres tipos de techos verdes tienen valores similares, esto probablemente indica que la capacidad de captura está influenciada por la vegetación y las condiciones específicas del sitio que por el tipo de techo verde. Según los datos estimados de CO₂/año, los techos semi-intensivos con

mayor superficie son efectivos a largo plazo, posiblemente debido a un equilibrio entre su tamaño, diseño y la calidad de su vegetación. En tanto que los techos verdes extensivos, aunque con menor eficiencia de captura, pueden compensar con su impacto por sus menores costos de instalación y mantenimiento; además de colocar en la mayor parte de sus áreas son exclusivamente cubiertas por vegetación.

Según los datos presentados, los techos verdes registrados en el inventario actual tienen una capacidad de capturar aproximadamente 0.077 tonCO₂/año. Lo cual se podría considerar una cifra pequeña en comparación a los 36.7 MtonCO₂ proyectados a emitir anualmente en la CDMX (World Resources Institute (WRI), Gobierno de la CDMX, & SEDEMA, 2015), preliminarmente se observa el potencial de esta SbN de multiplicarse en el territorio.

5.1.2. Análisis cualitativo por medio del índice VARI

A continuación, se presentan las imágenes renderizadas procesadas de las fotografías obtenidas con vehículos aéreos no tripulados, de los cinco techos verdes, en donde se su respectivo índice VARI con una rampa de color espectral con un rango de valores de -0.25 a 0.25, desde el rojo intenso hasta el azul, lo que permite una interpretación cualitativa visual de los resultados de cada sitio de estudio según la Tabla 8.

El techo verde extensivo del JB-UNAM tiene más de 25 años, cuenta con una superficie de 360m², por su diseño estilo de "monte" recibe mínimo mantenimiento permitiendo un desarrollo estacional de las plantas nativas. En la Figura 19, de acuerdo con el índice VARI, se identifican seis áreas densas con coloración azul densa conformada por nopales y pequeñas suculentas, estas se pueden considerar las de mejor calidad de vegetación.

En tanto que el índice VARI que presenta áreas naranjas a rojas son pastizales y plantas en floración estacionales, se observa un proceso de degradación del sustrato y disminución de cobertura vegetal, esto puede deberse al mismo tipo de techo y de mantenimiento establecido. La vegetación puede secarse, ser desplazada por especies invasoras, o desaparecer, especialmente si el sustrato se compacta o pierde nutrientes (Gan et al., 2023; Lee & Jim, 2019; Razzaghmanesh et al., 2014).

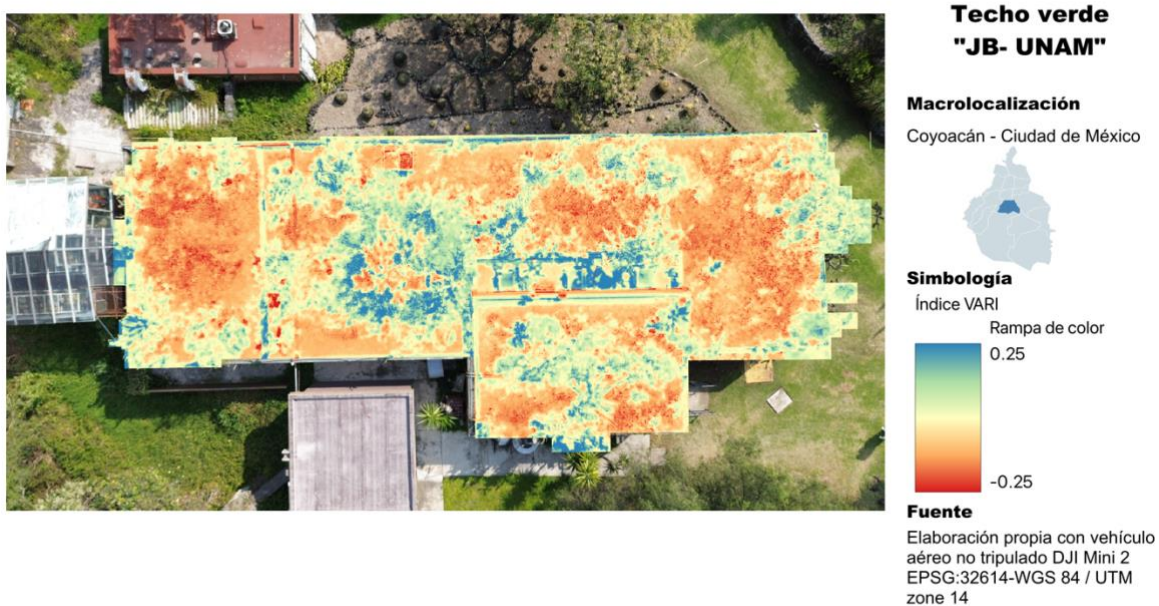


Figura 19. Índice VARI del techo verde del Jardín Botánico de la UNAM

La Figura 20 representa el techo verde de las oficinas del INFONAVIT ubicadas en Barranca del Muerto 280, Guadalupe Inn, Álvaro Obregón, instalado desde 2011 con un área de 5,265m² el techo verde intensivo con 2,342 m² de naturación directa e indirecta. Su mantenimiento durante las sequías se asegura mediante un sistema de riego y un cárcamo que controla la humedad. Además, cuenta con un espejo de agua, una pista para correr, huertos de hortalizas, compostaje y baños con regaderas alimentadas por energía solar.

A partir del índice VARI se observa en color azul la pista de correr de material sintético, también se distingue que la selección de plantas tiene cambios estacionales, a pesar del riguroso mantenimiento. Hasta el momento del análisis, se han reportado: 76 especies de suculentas y cactáceas, adaptadas a entornos con escasez de agua, según el índice VARI que exhiben baja reflectancia en el espectro verde en determinados períodos y tonalidades innatamente rojizas, se distinguen especies como *Agave spp.* y otras con rasgos similares, cuya reflectancia puede relacionarse con condiciones fisiológicas estables. Se incorporan además 44 tipos de árboles frutales, algunos de ellos en maceteros, estas muestran notables variaciones fenológicas, lo cual afecta la variabilidad espectral observada en el índice VARI. Igualmente, se registran 32 tipos de plantas medicinales y aromáticas, que se distinguen de baja densidad y menor reflectancia; además, hay 7 especies de plantas decorativas.

Las áreas con bajos valores en el índice VARI, representadas por tonalidades rojizas en la imagen, corresponden a regiones cubiertas de tezontle rojo, un material mineral no orgánico que puede influir en la interpretación. Este techo a pesar de contar con característica que pueden alterar el índice VARI, como lo es la infraestructura para personas, la relación de especies vegetales es heterogénea, lo que se infiere como un factor positivo para potenciar la regulación térmica y diversos servicios ecosistémicos urbanos tales como la captura de carbono, retención de agua y/o producción de alimentos.

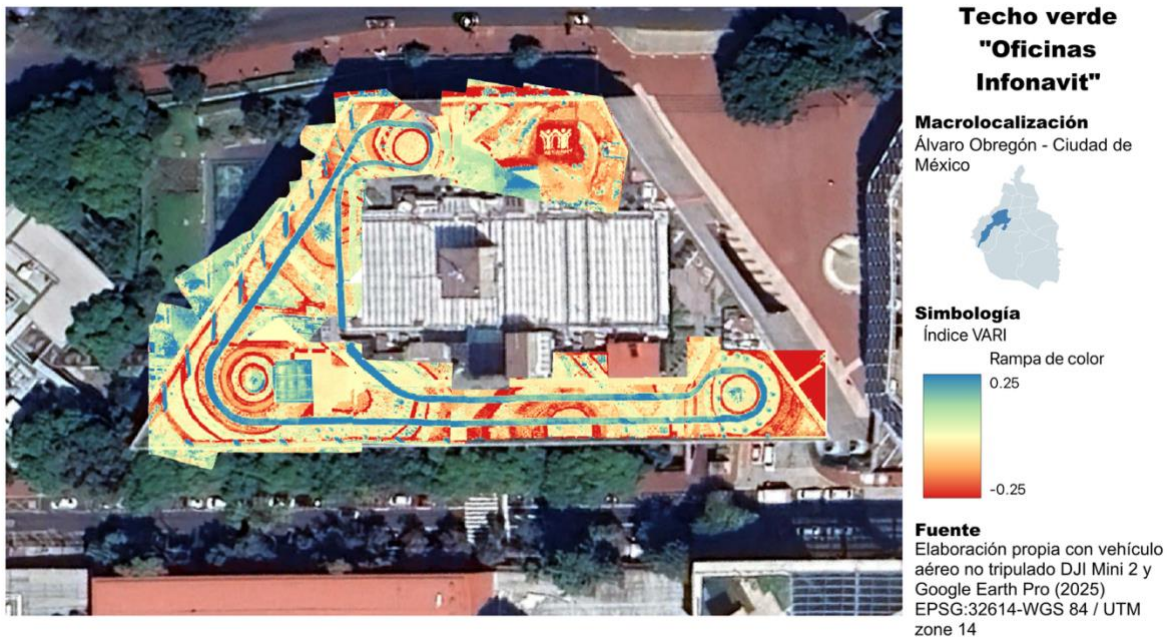


Figura 20. Índice VARI del techo verde de las Oficinas del Infonavit

En la Figura 21, se presenta el techo verde extensivo, ocupa el 25% del total del edificio del WEC de la ASF, este tiene trece años de instalación y una superficie aproximada de 740m². Su acceso es controlado y su mantenimiento es riguroso, en donde no se permite que las plantas se desarrollen sus ciclos completo. Según el responsable del sitio, la paleta vegetal se conforma por 27,982 plantas, provenientes de tres familias: diez tipos de *Crasulaceae*, cinco tipos de *Agavaceae* y un tipo de *Asteraceae*. Estos se delimitan en siete áreas donde los grupos de plantas se encuentran delimitadas por rejas con pequeños caminos de internos de piedra porosa que ayudan al sustrato del mismo techo verde.

De acuerdo con la rampa de colores del Índice VARI, la vegetación de este techo verde se consideraría de baja calidad y de escasa cantidad. Esto se puede explicar por las características biológicas de *S. griseum*, *S. pachyphyllum*, *S. rubrotinctum*, *Echeveria agavoides*, *Echeveria elegans*, *Echeveria secunda*, en tornarse la coloración rojiza por la exposición directa al calor y a la luz, así como *Graptosedums darley sunshine*, *G. vera higgins* con tonalidades naturalmente moradas. Aquellas áreas desde el color amarillo a azul claro son tonalidades de transición que

representan los espacios que se delimitan entre cada especie. Las zonas con mayor coloración azul se relacionan con las plantas *S. dendroideum* y los *Agave angustifolia*, *Agave attenuata* cuyas particularidades son la densidad de sus hojas, su altura y tonalidad verde, cualitativamente representando un mejor desempeño de las mismas.

En la Figura 22, se presenta el segundo techo verde extensivo de la ASF, en donde la vegetación ocupa el 80% del total del edificio del FAC, una superficie aproximada de 750m², tiene el mismo tiempo de instalación que el WEC. Tiene un área considerable con vegetación saludable, esto se puede atribuir a su cercanía con el edificio contiguo el cual lo protege de ciertas condiciones extremas climáticas. Seguido de esto se observan pocos espacios con tendencia al color azul ocupados por nopales, magueyes y cactáceas de gran tamaño. Similar al caso anterior, los tonos más cerca al rojo son suculentas de tamaño pequeño y pastizales. El tono azul claro azul, representa el pasillo conformado por un material orgánico.

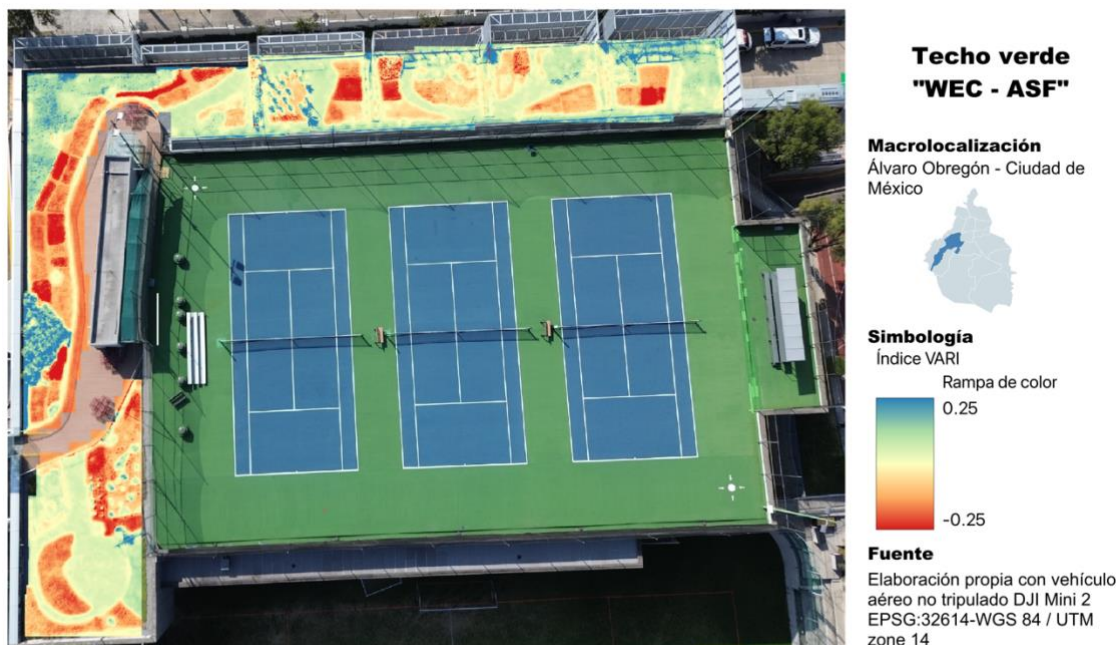


Figura 21. Índice VARI techo verde en el Wellness Center “Jenkins” (WEC) de la American School Foundation

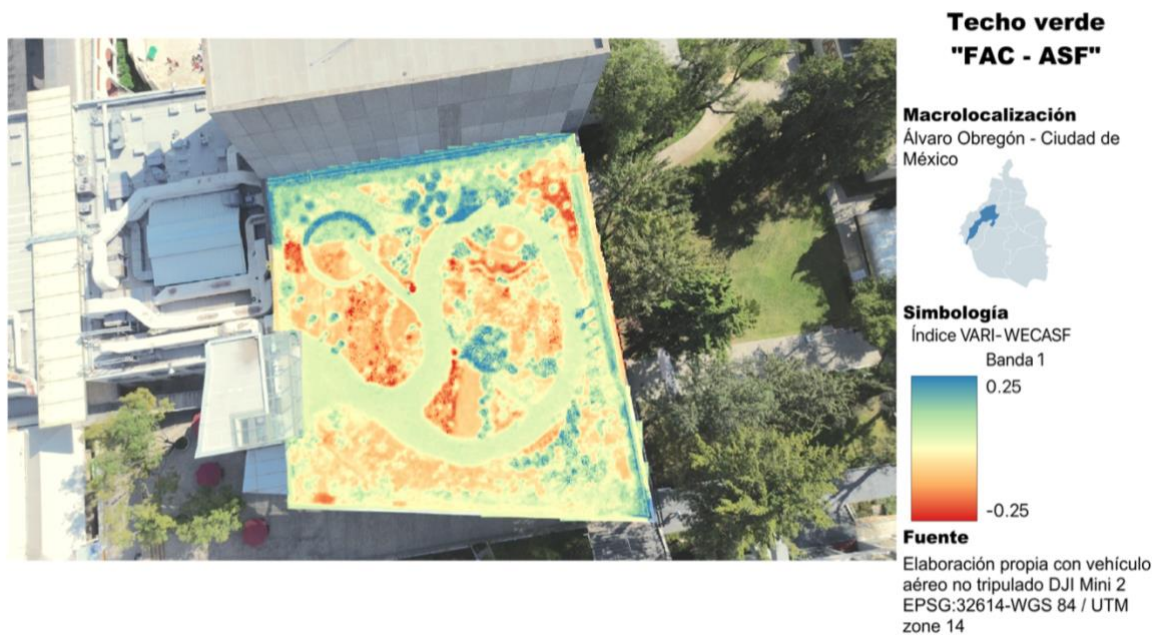


Figura 22. Índice VARI techo verde en el Fine Arts Center (FAC) de la American School Foundation

La Figura 23 corresponde al techo verde extensivo conocido como Jardín contemplativo del PLM con 14,575.50 m², localizado en la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, se encuentra sobre la tienda de supermercado Costco Wholesale Corporation (Cotsco). De acuerdo con Itziar de Luisa, presidenta de la Asociación de Colonos ZEDEC de Santa Fe (ZEDEC, SF A.C.), fue resultado de negociaciones con la empresa como una forma de mitigación y de continuar con el paisaje natural. El techo verde cuenta con un mantenimiento riguroso y un sistema de riego que se utiliza de forma constante, con la finalidad de compensar la escasez de lluvias durante la temporada de sequía.

El índice VARI, en donde la mayor parte del área tienen colores de naranja claro a amarillo pálido, lo que indica una presencia de vegetación baja a media, esto es común de ver en techos verdes extensivos con especies suculentas. Algunas zonas específicas destacan con tonos rojos intensos que contienen suculentas naturalmente rojizas, por su adaptación al estrés solar y no por un deterioro físico.

Se observan también franjas verde-azulas, indicando zonas con especies vegetales con un mejor desempeño y mayor densidad foliar.

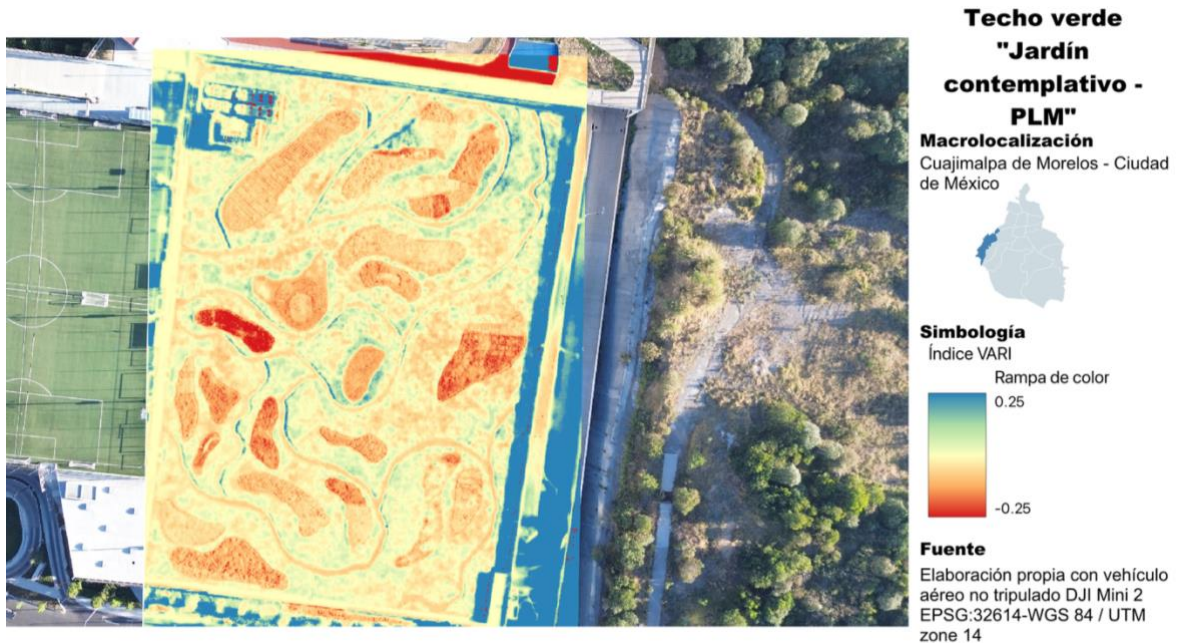


Figura 23. Índice VARI techo verde Jardín contemplativo del PLM

La Figura 24, corresponde al análisis espectral del techo verde semi intensivo colindante al jardín contemplativo del PLM, este espacio si es accesible y se usa con fines recreativos, en este caso el patinaje urbano o también conocido como skatepark. Se observa una distribución heterogénea, las zonas amplias en rojo oscuro y brillante, no representan vegetación, son las superficies de concreto y caminos del skatepark. Aquellas áreas en amarillo claro a naranja, corresponden a presencia de vegetación baja en crecimiento. También se aprecian superficies con valores positivos en el índice con coloración de verde a azul, lo que representa una cobertura vegetal densa y saludable.

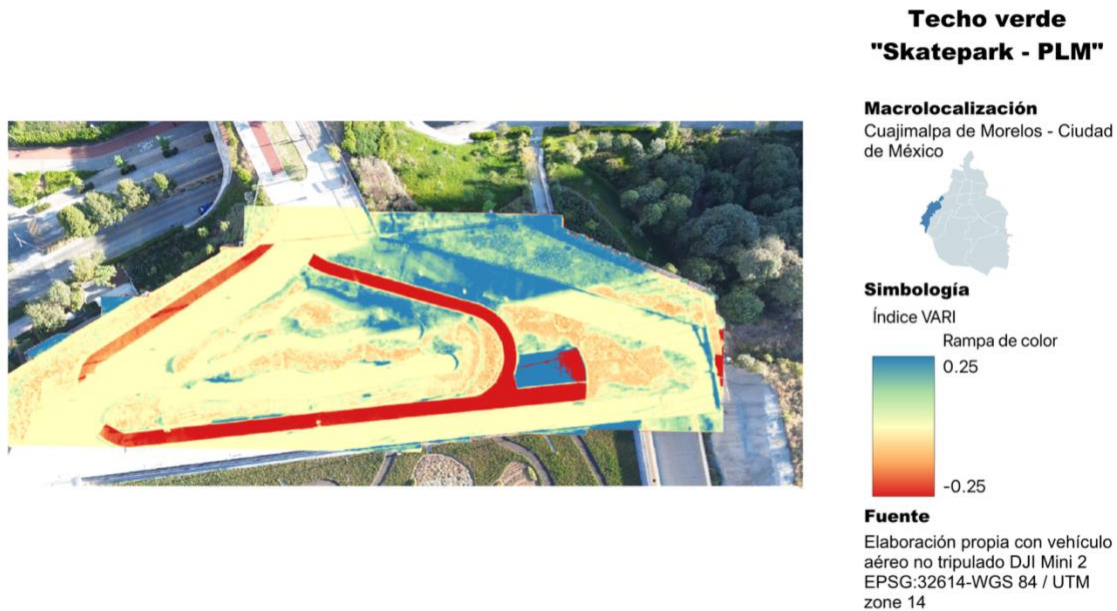


Figura 24. Índice VARI techo verde Skatepark del PLM

La Figura 25 presenta los TVLE del CIEMAD, en el cuadrante derecho el TVLE 1 instalado en 2019 y en el cuadrante izquierdo se observa el TVLE 2 instalado en el año 2022. En el TVLE 1 se observa la coloración ligera en tonalidades azules para las especies *S. dendroideum* las cuales se plantaron como plantulas, por lo que a lo largo de los cinco años han crecido y ocupado más de la mitad de la superficie de este techo. Las zonas cercanas a los colores rojos son ocupadas por suculentas de menor tamaño, por plantas oportunistas y pastizales que han arribado.

El TVLE 2 cuenta también con *S. dendroideum*, está representando en un tono arriba de azul, esto puede atribuirse a su edad, así como a que se sembró ya crecida, *S. pahyphyllum* es la segunda especie que presenta preliminarmente un buen desempeño ambiental. En la parte inferior derecha se encuentra *S. rubrotinctum* cuyas características son ser plantas cuyas hojas cambian de verde a rojo cuando son expuestas a la luz solar intensa como es en este caso.

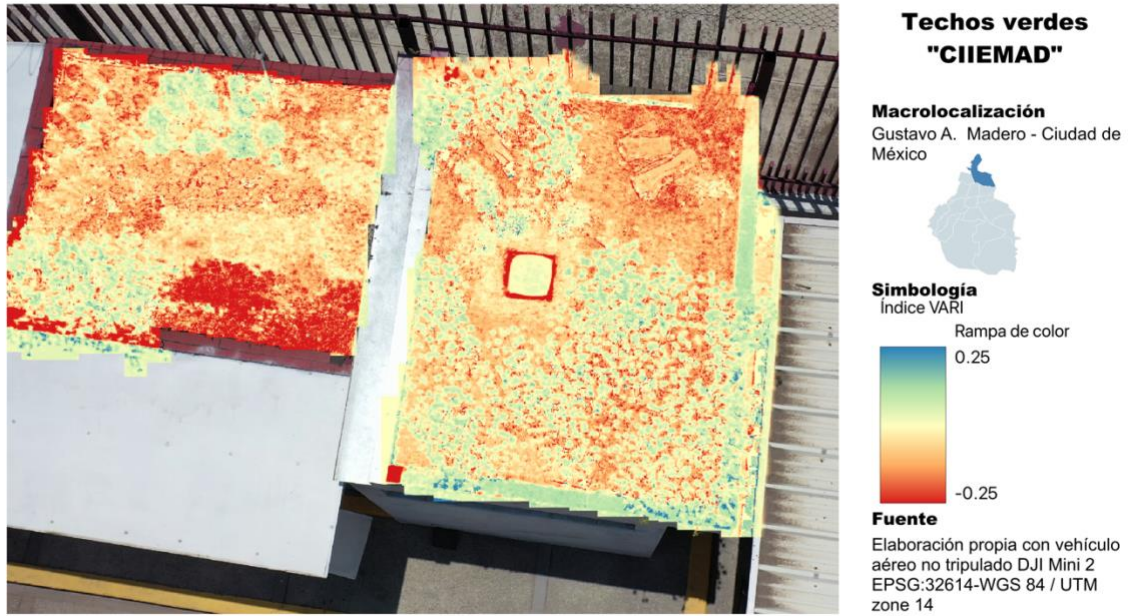


Figura 25. Índice VARI de los TVLE del CIEMAD-IPN

5.1.3 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

Se realizó el inventario de materiales, para recolectar y cuantificar los materiales empleados en la fabricación y uso. Esta recopilación de datos permite evaluar los efectos ambientales en cada etapa del ciclo de vida del producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Este registro permite identificar los recursos naturales utilizados, las emisiones contaminantes, los desechos generados y otros elementos relevantes para comprender el impacto ambiental integral del producto o servicio en consideración (Levy, 2017).

Tabla 10. Inventario de materiales para la elaboración del ACV comparativo

# Tipo de TV	Componente	Material / Proceso	Cantidad unitaria (kg/m ²)	Cantidad total (kg/m ²)
1 TVLE	Impermeabilizante con antiraíz(Imperquimia) Uniplas Jardín Flexo Nano SBS 4.0 PG ROJO	Bitumen (asfalto)	3.8	1
		Polimero reciclado Spun-Bonded (SBS) styrene-butadiene-styrene, elastomero termoplástico	1	
		Cargas inertes	3	
		Fibra poliéster reciclado	0.5	
		Gravilla ceramizada	1.5	
		P.Q. antiraíz	0.3	
1 TVC	Impermeabilizante (Bauder)	Bitumen (asfalto)	2	6
		Fibra de poliéster	2	
		Polietileno termofusible lineal de baja densidad (LLDPE)	2	
2 TVC	Anti raíz (Bauder)	Fibra de poliéster	0.3	0.6
		Fibra de polipropileno	0.3	
2 TVLE-TVLC	Geotextil tejido	Poliéster	0.2	0.2
3 TVLE	Drenante (MOR)	Paja	3.3	6.7
		Fibra de coco	3.3	
3 TVC	Drenante convencional (Geodren) Marca Danosa Danodren	Polietileno de alta densidad (PEAD)	1.8	1.8
4 TVLE-TVLC	Sustrato	Composta	51.5	103
		Tepojal	51.5	

Fuente: Elaboración propia

Inicialmente del 100% de los elementos empleados dentro de la estructura del TVLE se estima evitan el 27% de las emisiones al ambiente en la extracción y producción de materiales correspondientes a la capa drenante y la composta que forma parte de la capa de sustrato. Lo anterior considerando en el único impacto ambiental como el transporte desde su origen hasta la instalación dentro del TVLE.

Asimismo, se estima un ahorro aproximado del 18% al utilizar elementos reciclados en la capa del impermeabilizante, esto concuerda con la investigación de Shafique et al., (2020) que establece el uso de materiales reciclados para las capas es potencialmente una opción óptima para reducir los impactos ambientales. Este es un impermeabilizante con anti-raíz adicionado la huella de carbono generada por el transporte será menor ya que en su fabricación se usan productos que provienen de la misma región, entre el 10% y el 20% de los materiales, son extraídos, procesados y fabricados dentro de un radio de 800 kilómetros de Pachuca, Hidalgo, lugar donde se elabora (Imperquimia, 2021).

Para el ACV se considera que los impactos evitados son el reciclado de materiales derivados del petróleo el polímero SBS y la fibra de poliéster, que de acuerdo con la literatura pueden disminuir las emisiones de CO₂ en un 16%-73% por sustituir materiales vírgenes que reemplazan la necesidad de producir nuevos materiales ahorrando recursos y energía (Rahim & Abdul Raman, 2017; Schwarz et al., 2021) por lo que en este trabajo para integrarlos en el software se ajusta a un 45%. Además por en la capa drenante compuesta por MOR, se ingresan al software como materiales "residuo" al ser impactos evitados ya que estos no terminan en vertederos o incineradores, eliminando así las emisiones asociadas a estos procesos.

Respecto al impermeabilizante considera la utilización del polímero SBS, se utiliza el material "eslastómero, aislamiento de tubos" como una aproximación por sus similitudes en composición química, propiedades físicas y aplicaciones industriales. Estos materiales cuentan con resistencia a la humedad, elasticidad y tolerancia térmica (Schaur et al., 2017; Vargas et al., 2005). Además, está cimentado en cauchos sintéticos y polímeros termoplásticos, utilizados por sus propiedades

flexibles (Krings et al., 2021). También para el material P.Q. antirraíz se selecciona el "óxido de cobre", ya que se ha demostrado que inhibe el crecimiento (Khan et al., 2023; Kolbert et al., 2019) actúa como un componente eficaz que proporciona protección y reduce posibles enfermedades a la planta (Kamel et al., 2022).

La Figura 26 sirvió como guía para elaborar los nueve sistemas de productos en el software OpenLCA, considerando todas las capas y los dos tipos de techos verdes a comparar. Para ello, se utilizaron las bases de datos de Ecoinvent (Wernet, G., et.al., 2016). A continuación, se presentan los modelos gráficos generados en el software para el TVLE y el TVC (Figura 27 y 28). En referencia al transporte se toma en cuenta el tipo de transporte y la distancia según la Tabla 12.

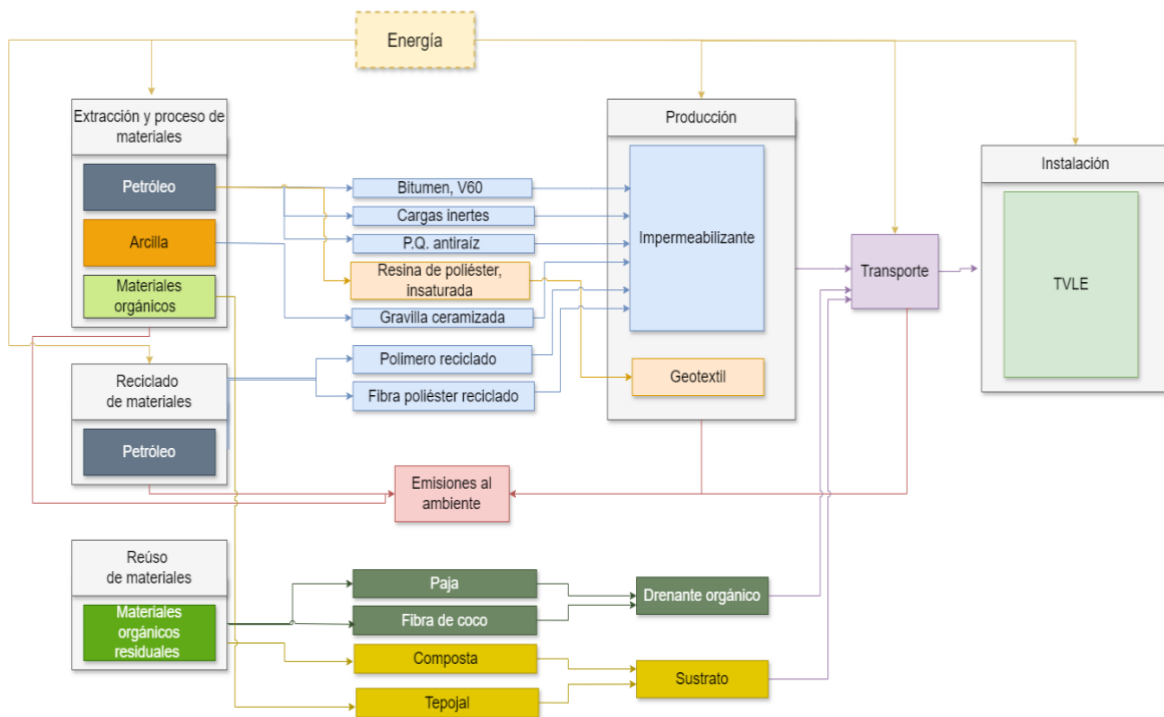


Figura 26. Diagrama de flujo para el ACV simplificado del TVLE

Tabla 11. Consideraciones de transporte para el ACV

# Tipo de TV	Componente	Origen	Tipo de transporte	Distancia (T*km)
1 TVLE	Impermeabilizante (Imperquimia) Uniplas Jardin Flexo Nano SBS 4.0 PG ROJO	Tecámac, México	Camión (comercial ligero con motor diésel)	0.45
1 TVC	Impermeabilizante (Bauder) Anti raíz (Bauder)	Ipswich, Reino Unido	Camión (combinado con motor diésel)	1,000
			Barco (contenedor marítimo)	7,500
2 TVLE-TVC	Geotextil tejido	Québec, Canadá	Barco (contenedor marítimo)	4,250
			Camión (combinado con motor diésel)	430
3 TVC	Drenante convencional (Geodren) Marca Danosa Danodren	Madrid, España	Barco (contenedor marítimo)	10,000
			Camión (combinado con motor diésel)	400
4 TVLE-TVC	Sustrato	Queretáro, México	Camión (comercial ligero con motor diésel)	22.15

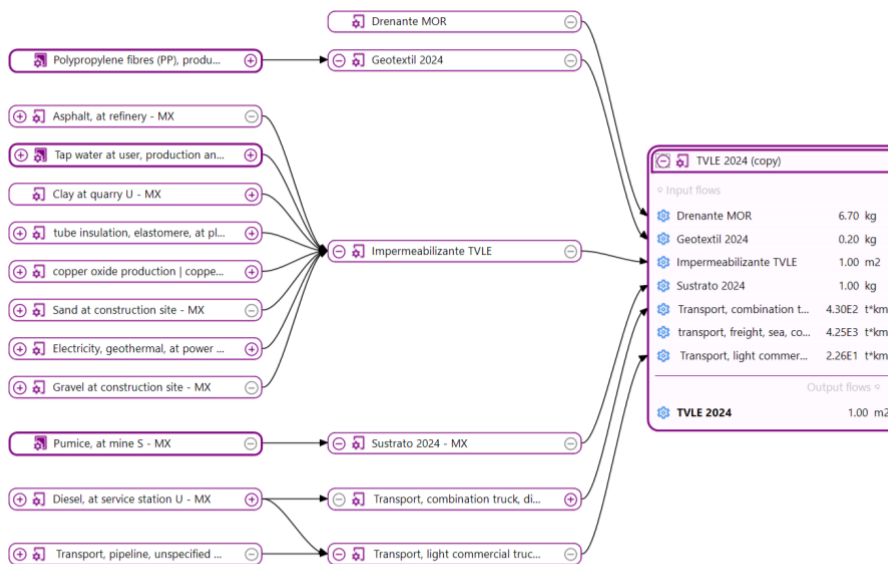


Figura 27. Modelo gráfico del sistema de producto del TVLE

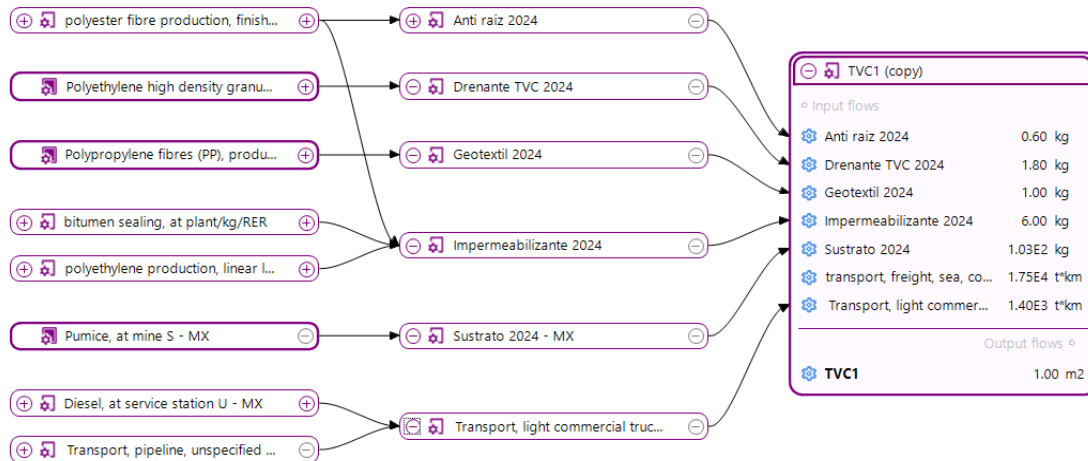


Figura 28. Modelo gráfico del sistema de producto del TVC

En la Figura 29 se desglosan los impactos asociados al uso de recursos y energía para la producción del TVLE y el TVC. Se puede observar que el TVC tiene un impacto mayor en el consumo de petróleo crudo y diésel con valores de 53.30 kg CO₂ eq y 62.50 kg CO₂ eq respectivamente, frente a los 2.50 kg CO₂ eq y 2.91 kg CO₂ eq del TVLE. En cuanto al consumo de electricidad, también el TVC depende de fuentes energéticas que emplean más carbono que el TVLE, lo que explica su mayor impacto ambiental. En relación al impacto de materiales como el "vidrio para envases", el TVC genera 16.40 kg CO₂ eq, mientras que el TVLE incluye procesos de la EC en ciertos componentes en su estructura genera 1.11 kg CO₂.

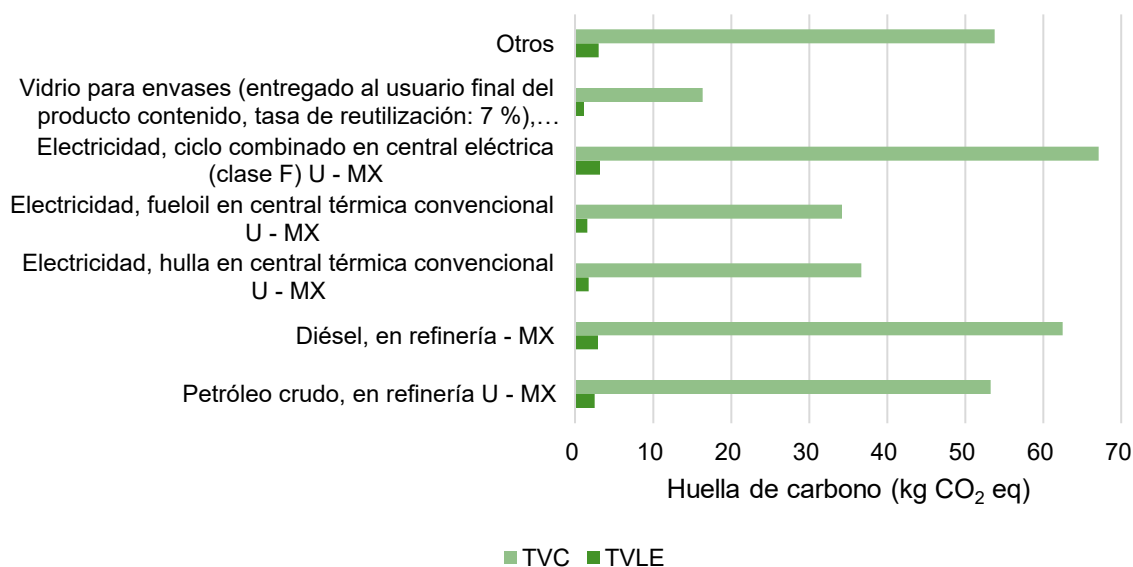


Figura 29. Comparación del impacto por uso recursos en el ACV del TVLE y el TVC

La Tabla 13 presenta el impacto ambiental del transporte de los insumos para cada tipo de techo verde. Estas emisiones están vinculadas al uso de dos tipos de vehículos: camión comercial ligero y camión unitario, ambos propulsados por diésel. El TVC, al incluir tres materiales importados y recorrer mayores distancias, genera un impacto ambiental significativamente más alto. En contraste, los materiales del TVLE, de origen nacional, permiten una cadena de suministro más eficiente y reducen considerablemente las emisiones de transporte.

Tabla 12. Comparación del impacto por transporte en el ACV del TVLE y el TVC

Párametro (kgCO ₂ eq)	TVLE	TVC
Transporte, camión comercial ligero, propulsado por diésel U - MX	16.20	1,000.00
Transporte, camión unitario, propulsado por diésel U - MX	0.98	20.70
Total	17.18	1,020.70

En la Tabla 14, se comparan los valores de huella de carbono totales para el TVLE y TVC, así como de los componentes que son diferentes entre ellos: impermeabilizante y drenante. En el caso del impermeabilizante la huella de carbono del TVC, es más alta, 5.1699 kg CO₂ eq. Con una diferencia del 20.1%

respecto al TVLE, esto por el uso de materiales reciclados y locales, en contraste con el consumo de materiales vírgenes del impermeabilizante del TVC.

En relación con el drenante de MOR del TVLE el cual no contribuye a la huella de carbono, con un valor de 0 kg CO₂ eq, como impacto evitado al no llegar a un tiradero por lo que no se tienen emisiones significativas en su extracción o procesamiento. Mientras que el drenante del TVC con una huella de carbono de 0.9432 kg CO₂ eq aún con un valor bajo este impacto puede ser derivado del uso de polímero plásticos.

Tabla 13. Huella de carbono a partir de los resultados del ACV

Capa	Huella de carbono (kg CO ₂ eq)	
	TVLE	TVC
Impermeabilizante	4.3043	5.16997
Drenante	0	0.94321
Total TV	68.4452	1,364.7824

La huella de carbono del TVLE se reduce en un 94.98% respecto al TVC cuyo valor total es de 1,364.7824 kg CO₂ eq la cual se atribuye al uso de materiales sintéticos y con procesos que impactan en mayor cantidad en las emisiones. Mientras que el valor total de la huella de carbono en el TVLE es 68.4452 kg CO₂ eq, que utiliza materiales locales y de menor impacto ambiental considerablemente más bajo.

5.1.4 Análisis del rendimiento térmico

Respecto a la evolución de la vegetación en el TVLE, del año de instalación, 2022, al presente año, 2024 se estimó un aumento en promedio del 5.40% de las siete especies de flora en el TVLE, lo que sugiere un crecimiento saludable y una adaptación positiva al entorno (Ndayambaje et al., 2024), así como un mejor rendimiento en términos de retención de agua, captura de carbono y biodiversidad, regulación térmica.

En la Figura 30 se observa el aumento de la cobertura vegetal del 2022 al 2024, este último año se realizaron medidas en las dos temporadas. En el primer semestre del año *S. nussbamerianum*, con hojas de forma triangular y crecimiento opuesta

en tallos ramificados, se reprodujo y desarrolló de tal forma que fue la especie con mayor superficie respecto a su área de cobertura inicial con un promedio de 13.67%. Mientras que *E. agavoides* con hojas en disposición circular en una misma altura de color verde grisáceo, con crecimiento de brotes a su alrededor, fue la que menor extensión obtuvo en este primer período evaluado con un promedio de 1.58%.

En relación a la cobertura vegetal del segundo semestre del año, *G. paraguayense* tiene el mayor incremento, del 8.33% al 22.00%. Su adaptabilidad se debe a su capacidad de regeneración a partir de hojas caídas y a su tolerancia a temperaturas extremas (Buckland et al., 2023). A esta especie le sigue *S.d* por su adaptabilidad a condiciones de sequía y su capacidad para desarrollarse en sustratos con bajo espesor por sistema radicular compacto (Rakhmankulova et al., 2023; Vasl et al., 2017).

E. agavoides tiene el segundo incremento de cobertura de 9.5% a 15%. Esto puede atribuirse a su adaptabilidad a diversas condiciones climáticas y a su capacidad para formar densas rosetas que optimizan la captación de luz solar (Ha Tran et al., 2024; López-Angulo et al., 2022). En tanto que las especies que disminuyeron su área de cobertura entre el 6-15%. fueron *S. nussbaumerianum*, *E. elegans*, y *S. r.* Respecto al comportamiento de la primera especie mencionada puede estar relacionado con su alta sensibilidad a condiciones de sombreado o exceso de humedad, que pueden limitar su capacidad de fotosíntesis y propiciar enfermedades fúngicas (Rakhmankulova et al., 2023).

En el caso de *E. elegans*, aunque esta especie tiene propiedades físicas para tolerar sequías y bajas temperaturas, el exceso de riego o ambientes demasiado húmedos pueden afectar negativamente su salud, promoviendo la pudrición radicular y limitando su crecimiento (López-Angulo et al., 2022; Ortiz-Oliveros et al., 2024).

Por último *S. r.* es vulnerable a temperaturas extremas, que pueden causar deshidratación de sus hojas si no se manejan adecuadamente los niveles de humedad y luz (Ma et al., 2019; Terri et al., 1986). Además, su crecimiento puede verse afectado por competir con otras especies más productivas en el mismo espacio, como lo ha demostrado ser *S.d*. Adicional a esto durante las inspecciones

visuales se determinó que la probable presencia de animales de la zona como aves o roedores que afectaron su crecimiento.

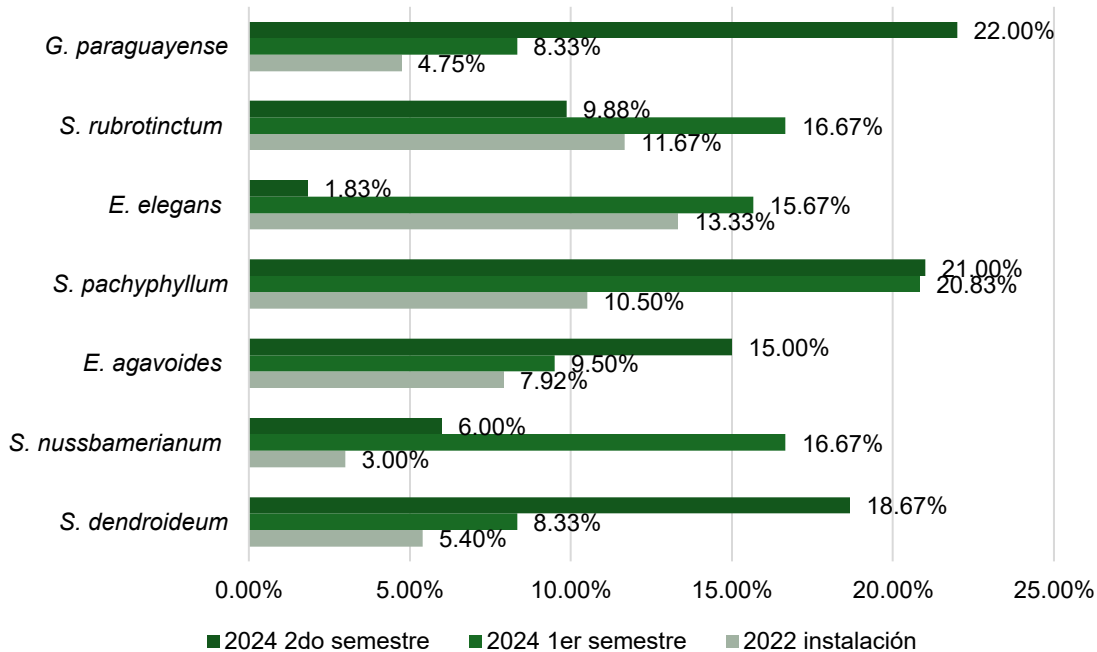


Figura 30. Gráfica de la cobertura vegetal 2022-2024

Respecto a la regulación térmica, se reporta que el 99.1% del calor ganado en los techos verdes proviene de la radiación solar, en tanto que la disipación del calor se logra por la evapotranspiración, la radiación de onda larga y la fotosíntesis de las plantas (Feng et al., 2010). Se estimó la RS ya que al incidir sobre un techo común parte de esta energía se absorbe y se convierte en calor, elevando la temperatura interna y superficial.

En la Tabla 15 se observa que la menor diferencia respecto al área sin cobertura vegetal (ASV) donde se considera la RS es del 100% es de 2 W/m² con *E. Elegans*, que a pesar de su aumento en promedio del 2.33% en dos años, el crecimiento compacto de sus brotes y hojas no dan una cobertura mayor. A diferencia de *G. paraguayense* que en este mismo periodo creció 3.58% con la diferencia más grande RS en cuanto a la ASV de 628.53 W/m², esta planta en conjunto de *S. nussbamerianum*, seguidas de *S. d* y *S. r* son aquellas en donde la radiación solar es menor y por ende habrá un impacto positivo tanto en la temperatura interna como

en la ambiental. Las Figuras 31 y 32, son gráficas que se divide por cada sección del TVLE según la distribución porcentual de la RS total. La mayor proporción de RS se encuentra en el ASV y en la sección ocupada por las plantas *E. elegans*. Por otro lado, las características físicas de *S. nussbamerianum* hacen que sea la zona de menor porcentaje de RS que llega a la base del techo.

Tabla 14. Radiación solar en el TVLE

Sección del TVLE (Especie)	Radiación solar (kWh)	
	Temporada de lluvias	Temporada de secas
<i>S. dendroideum</i>	0.0643	0.063
<i>S. nussbamerianum</i>	0.0467	0.1852
<i>E. agavoides</i>	0.1481	0.7689
<i>S. pachyphyllum</i>	0.09127	0.2039
<i>E. elegans</i>	0.6708	0.7808
<i>S. rubrotinctum</i>	0.0638	0.5767
<i>G. paraguayense</i>	0.0443	0.0906
Área sin cobertura vegetal (ASV)	0.6728	0.7337

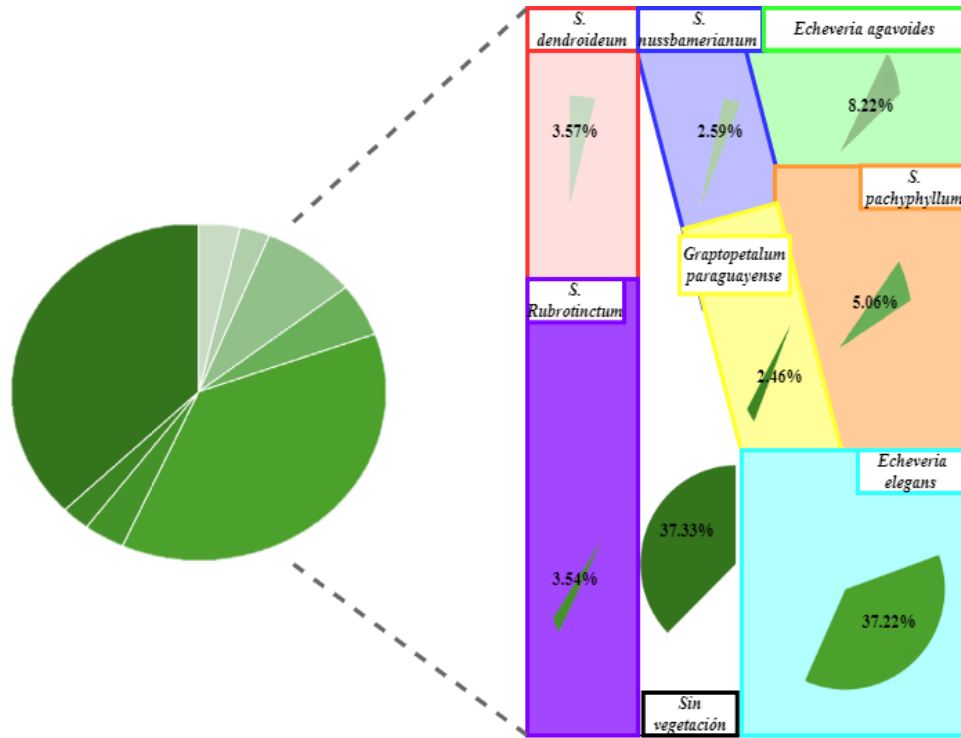


Figura 31. Distribución de la radiación solar (RS) en temporada de lluvias en el TVLE.

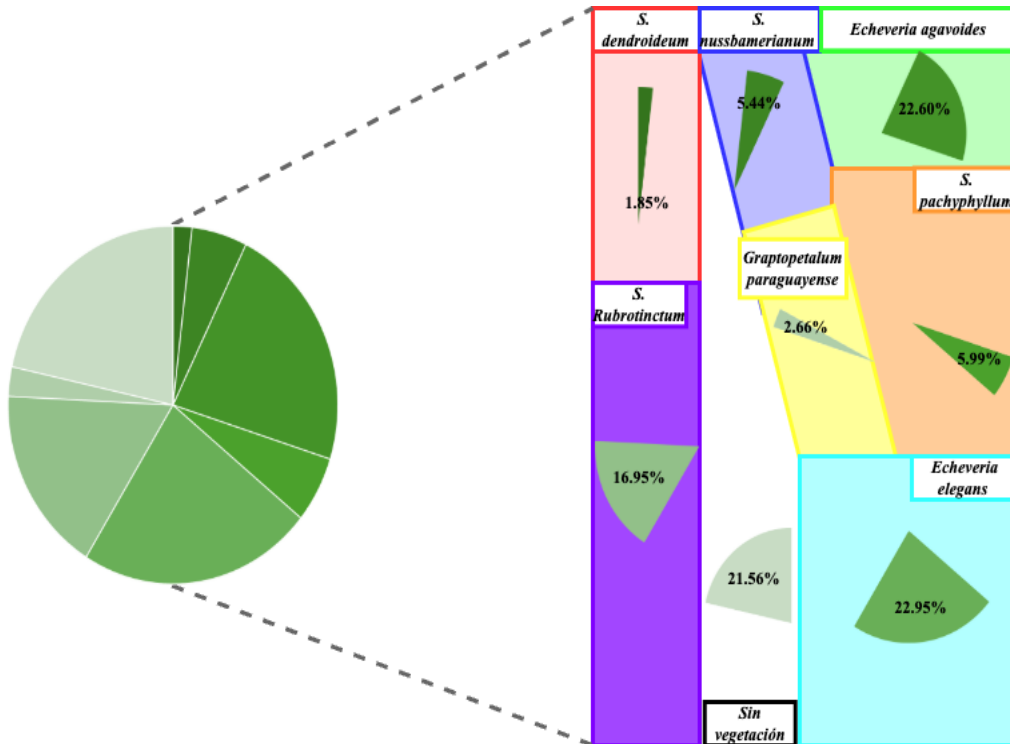


Figura 32. Distribución de la radiación solar (RS) en temporada de secas en el TVLE

El rendimiento de los techos verdes para disminuir la RS y con ello mitigar las ICU dependerá del tipo y densidad de la vegetación (Klein & Coffman, 2015), en total se reduce más del 75% del total de la RS. en este caso se observa que *S. pachyphyllum*, *S. nussbamerianum* y *S. r* son las especies con mayor cobertura vegetal en la superficie del TVLE y son las mismas que tienen baja RS en época de lluvias. En comparación con la temporada de secas las especies *G. paraguayense* y *S. d*, son las especies con mayor cobertura y menor porcentaje de RS. Para ambos períodos *E. elegans* tiene el valor más alto en RS, esto corresponde a su poca cobertura vegetal, por lo que no se considera como una planta ideal para un TVLE.

La Tabla 16 presenta los resultados obtenidos de las estimaciones de la temperatura superficial y ambiental, en función de la sección del TVLE, también en ambas temporadas. Las especies del género *Sedum* y *Graptopetalum* presentaron una mayor capacidad de regulación térmica, manteniendo temperaturas superficiales relativamente elevadas en época seca, lo cual indica resiliencia ante estrés hídrico y eficiencia en la disipación térmica.

Tabla 15. Variación de temperatura y ahorro energético

Sección del TVLE (Especie)	Temperatura superficial (°C)		Temperatura ambiental (°C)		Ahorro energético (kWh/m ²)	
	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas
<i>S. dendroideum</i>	30.4235	33.5365	2.738115	3.0183	383.48	422.73
<i>S. nussbamerianum</i>	31.3035	27.429	2.8173	2.4686	789.14	691.49
<i>E. agavoides</i>	26.235	-1.7595	2.3612	-0.1583	330.69	-21.99
<i>S. pachyphyllum</i>	29.0765	26.4925	2.6169	2.3843	916.22	834.91
<i>E. elegans</i>	0.1	-2.3535	0.009	-0.2118	2.61	-55.43
<i>S. rubroinctum</i>	30.45	7.8505	2.7405	0.706	767.59	198.2
<i>G. paraguayense</i>	31.4265	32.1585	2.8284	2.8943	396.08	405.34

Respecto a la temperatura ambiental (Figura 33), todas las especies contribuyen a su disminución, particularmente notable en la temporada de lluvias (rectángulos azules), como sucede con la RS y por ser valores calculados a partir de la misma especie con mejor desempeño son *G. paraguayense* y *S.d*, está última con un desempeño mejor en temporada de secas.

En comparación con las especies *E. agavoides* y *E. elegans*, que presentan reducciones térmicas negativas en la temporada de secas (rectángulos naranjas), esto podría ser por sus características físicas al de rosetas compactas que no generan suficiente sombra. El desempeño estacional en *S.pachyphyllum* y *S. nussbamerianum* es consistente en ambas temporadas.

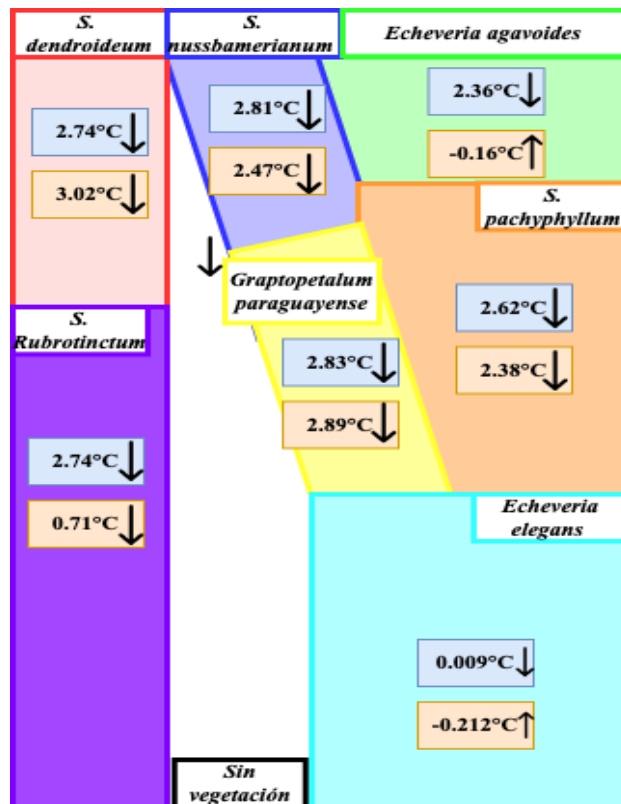


Figura 33. Desempeño térmico superficial promedio en el TVLE

A partir de estos datos se calculó el ahorro energético por especie y por temporada, presentados en la Tabla 17, considerando la disminución en el consumo energético por la disminución en la carga térmica. Se obtuvo que un TVLE de 6m² puede evitar un consumo en promedio de 6,529.57 kWh/año.

Tabla 16. Ahorro energético estimado por temporada

Temporada	Ahorro diario (kWh/día)	Período (días)	Ahorro estacional (kWh)
Lluvias	21.483	180	3,866.94
Secas	14.7924	180	2,662.632
Anual	-	360	6,529.572

La eficiencia térmica depende de la presencia vegetal, la fisiología de la planta, densidad de cobertura y la respuesta estacional (K. Zhang et al., 2022). Desde una perspectiva de diseño, la selección de especies debe contemplar la combinación de aquellas especies con diferentes tolerancias a la sequía, formas de crecimiento y épocas de floración (Cook-Patton & Bauerle, 2012; Ksiazek-Mikenas et al., 2023; Maclvor & Lundholm, 2011). De esta forma se garantiza el funcionamiento y la estabilidad durante todo el año. Además, la diversidad de la vegetación crea microhábitats, atrayendo una diversidad de fauna desde insectos hasta aves (Braaker et al., 2014; Calviño et al., 2023; Wooster et al., 2022).

Aunque las plantas de *Sedum* lleguen a una sequía severa, estas se pueden regenerar anualmente, al ser tolerantes a la sequía lo que permite mantener su desempeño térmico (Gurrea-Ysasi et al., 2022; Sněhota et al., 2021; Zheng et al., 2022). En el TVLE de estudio, las especies que tuvieron un desempeño térmico estable durante las temporadas *S. pachyphyllum*, *S. nussbamerianum*, *G. paraguayense* y *S. dendroideum*, estas dos últimas con características fisiológicas que favorecen la retención hídrica permitiendo un funcionamiento superior en períodos secos.

A pesar de que el riego se ha establecido como esencial para preservar la funcionalidad ecológica de los techos verdes (Du et al., 2019; Szota et al., 2017), ya que de no contar con el puede disminuir la capacidad de enfriamiento y aumentar el estrés hídrico en las plantas (Juras, 2023; Pirouz et al., 2021; G. Zhang et al., 2020). El TVLE no fue irrigado después de su instalación; los resultados de este análisis sugieren que su mantenimiento y supervivencia son posibles únicamente aprovechando el agua pluvial sin necesidad de recurrir al agua potable doméstica. Este aspecto es relevante para su implementación a gran escala en la CDMX, donde la disponibilidad de agua ha disminuido en las últimas décadas (Magaña et al., 2024).

5.1.5 Análisis de decisiones multicriterio basado en SIG

La identificación de sitios potenciales a colocar TVLE (Figura 34), con distintos tres niveles de sombreado en las zonas prioritarias: media, alta y muy alta, esta última identificada con color negro. Esta superposición se considera como una estrategia para maximizar el impacto sustentable en aquellas áreas de la CDMX vulnerables principalmente al estrés térmico (Mutani & Todeschi, 2020).

La distribución de estas zonas muestra un patrón que se extiende principalmente desde la parte media hacia el noroeste de la CDMX, donde se concentran las mayores necesidades de intervención ambiental. También se observa la clasificación de acuerdo al tipo de sitio: centros comerciales, hospitales, mercados y supermercados, que por sus características tienen grandes superficies de techo, así como su demanda energética, alta densidad de uso e impacto social, son potenciales lugares a implementar TVLE.

Una de las características de los techos verdes es su idoneidad para establecerse en áreas densas y urbanizadas que no tienen espacio disponible para AVU a nivel del suelo (U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2018; U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2016). Por lo que su ubicación estratégica es guiada por criterios socioambientales para la adaptación urbana ante los impactos del cambio climático.

De acuerdo con la clasificación espacial se plantea la adopción de TVLE principalmente en Álvaro Obregón, Benito Juárez, Coyoacán, Gustavo A. Madero, Iztapalapa y Tlalpan, alcaldías que muestran alta densidad urbana, elevadas concentraciones de contaminantes del aire, niveles críticos del NDVI y de TST permitiría optimizar los beneficios microclimáticos y ecológicos.

Los hospitales seleccionados están marcados en rosa claro y se encuentran en áreas de prioridad alta y muy alta. Los mercados, representados en naranja, están principalmente distribuidos en las zonas centrales y algunas periféricas. Los supermercados, en color rojo en zonas de prioridad media y alta. Los centros comerciales, marcados en amarillo, están más concentrados en áreas de prioridad media y alta, principalmente en el norte y el poniente de la ciudad.

El área total de la CDMX se divide en 59% suelo de conservación en la parte sur poniente, 41% en suelo urbano ubicado en zona centro, 5% ocupado por AVU y 0.41% por las vialidades primarias, dando así aproximadamente 540.81km² de superficie construida. Se presentan los tres niveles de prioridad para instalar TVLE cuya superficie total es de 428.05 km², cuya captación sería de 1.10MtonCO₂/año aproximadamente, siendo el 3% de las 36.7MtonCO₂/año estimadas a emitir anualmente en la CDMX a partir del 2025 (WRI, Gobierno de la CDMX & SEDEMA, 2015).

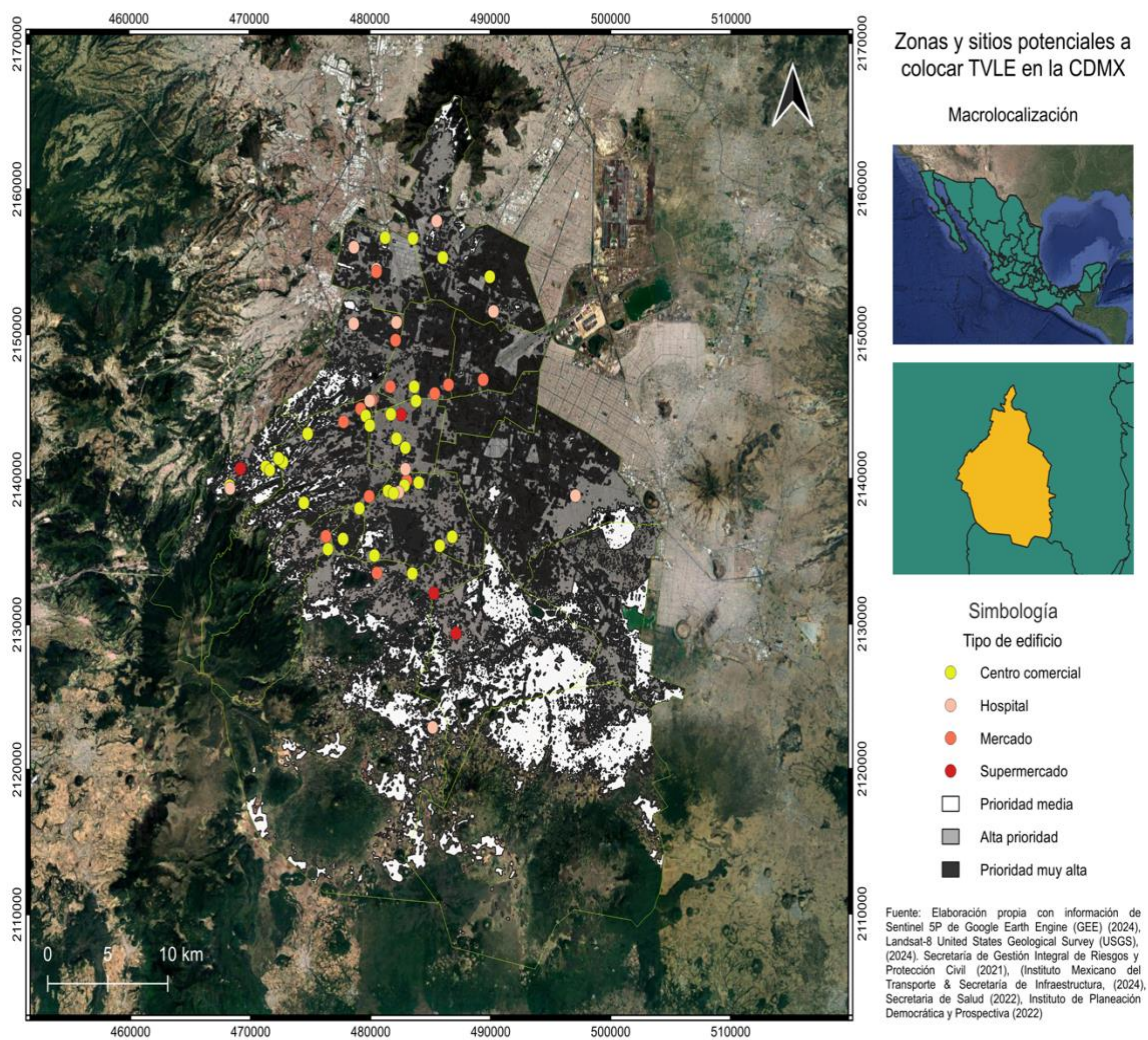


Figura 34. Identificación de sitios potenciales a colocar TVLE

El responsable del 58.9% de las emisiones anuales, es el transporte particular que emite 4.6tonCO₂ (EPA, 2025) en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), del cual es parte la CDMX. En este sentido, la cantidad estimada a capturar de instalar TVLE en la superficie total potencial mitigaría las emisiones de 249,950 vehículos, representando el 5% del parque vehicular diario de la ZMVM que consta de 4.8 millones de autos (Comisión Ambiental Metropolitana, 2011; INEGI, 2025).

Tabla 17. Resultados potenciales según el nivel de prioridad

Nivel de prioridad	Superficie total potencial (km ²)	Cantidad potencial a capturar (kgCO ₂ /año)
3	152.64	393,811,200.00
4	229.48	592,058,400.00
5	45.93	118,499,400.00
Total	428.05	1,104,369,000.00

Según lo establecido en el 4.3.6 de la metodología, se eligieron 60 sitios (Tabla A2 del Anexo 1) para proyectar la posible implementación de TVLE en cuatro clases de inmuebles: centros comerciales (52.7%), supermercados (20.75%), hospitales (14.32%) y los mercados (12.44%). La superficie potencial total estimada es de 428,130m² que podría capturar 0.0011MtonCO₂/año, representando el 0.003% de las emisiones anuales previstas en la CDMX. De considerar estos valores en la mitigación de las emisiones del parque vehicular por la instalación de TVLE en los edificios propuestos equivaldría a disminuir las emisiones anuales de aproximadamente 240 autos particulares.

Tabla 18. Tipología y cantidad de inmuebles proyectados para implementar TVLE

Nivel de prioridad	Tipo de inmueble				Superficie construida proyectada para TVLE (m ²)	Cantidad potencial a capturar (kgCO ₂ /año)
	Mercado	Hospital	Centro comercial	Supermercado		
3	3	3	9	5	172,783.00	446,076.49
4	5	5	9	1	134,828.00	347,856.24
5	5	5	6	4	120,519.00	311,145.73
Total	13	13	24	10	428,130.00	1,105,078.46

Los resultados obtenidos reafirman a esta SbN como una estrategia complementaria dentro de un enfoque mayor de adaptación urbana al cambio climático (Knapp et al., 2019; Wooster et al., 2022) ya que su valor no solo consiste en la captura de carbono, sino también en aprovechar sus co-beneficios, la gestión del agua pluvial, la creación de AVU en zonas densamente pobladas y la regulación de la temperatura ambiental (Aleksejeva et al., 2024; Barriuso & Urbano, 2021), sin reemplazar medidas que consideren la disminución de emisiones en el transporte o la industria.

Respecto a la reducción de temperatura ambiental, según los resultados del 5.1.4, se propone para todos los inmuebles potenciales la siguiente distribución de vegetación de los TVLE: *S. pachyphyllum* (30%), *S. nussbamerianum* (25%), *S. dendroideum* (16%), *S. rubrotinctum* (16%), *G. paraguayense* (13%) en toda la superficie proyectada para TVLE se reduce la temperatura ambiental entre 2.7°C y 2.2°C en temporada de lluvias y secas respectivamente.

Considerando un centro comercial con más de 20,000m² en zona de alta prioridad en la parte noroeste de la CDMX, este TVLE generaría un enfriamiento superficial promedio, reduciría la transferencia térmica al interior lo que deriva en la disminución de la demanda energética y económica que se describirá en el 5.4.1. Este impacto microclimático local contribuye a reducir el almacenamiento térmico diurno, limitando la liberación nocturna de calor que intensifica la ICU (Barrera Alarcón et al., 2023).

La instalación de TVLE en los inmuebles proyectados generaría un aumento de 0.63% en las AVU de la CDMX. En cuanto al impacto en la relación AVU/hab., con la población actualizada y la superficie proyectada de TVLE, se estiman 7.3 m²AVU/hab. en comparación con los 7.5m²AVU/hab, reportados oficialmente con base en la población del 2015. Este descenso puede atribuirse al crecimiento demográfico, que incrementó de 8.9 millones en 2015 a 9.2 millones en 2024 (Consejo Nacional de Población (CONAPO), 2024). Si continúa esta tendencia, la proporción de AVU/hab. seguirá disminuyendo.

En un escenario hipotético, si se cubriera con TVLE toda la superficie potencial disponible, la relación alcanzaría aproximadamente 53.85 m²AVU/hab, lo que significaría un incremento seis veces mayor respecto al valor actual. Dicha estimación demuestra teóricamente el potencial de los techos verdes para compensar el déficit actual de AVU; sin embargo, en la práctica, su implementación resultaría inviable principalmente por el diseño de las estructuras, las cuales no soportarían el peso extra de un techo verde sin realizar modificaciones, sobre todo en edificios antiguos.

Teniendo en cuenta que la urbanización de la CDMX se aceleró en la segunda mitad del siglo XX (Garza, 2005), en este período la infraestructura no fue construida para soportar cargas adicionales, cerca del 40% de las construcciones superan los 40 años (Gobierno CDMX, 2004), lo que genera limitaciones técnicas para implementar TVLE.

En este contexto, la norma ambiental al NADF-014-RNAT-2007 indica que un sistema de naturación extensivo puede soportar una carga de 110 a 200 kg/m² teniendo en cuenta el peso del sistema cuando está saturado, en su máxima capacidad de agua y estado de madurez de la vegetación (SEDEMA, 2018). Para inmuebles existentes, la factibilidad de implementación dependerá del análisis técnico individual que probablemente derivarán en reforzamientos estructurales.

En este sentido, un último factor identificado que condiciona la factibilidad en la adopción de esta SbN a esta escala es la tipología de la infraestructura. Las cubiertas de uso habitacional, especialmente en vivienda unifamiliar, presentan limitaciones por dimensiones reducidas y baja capacidad de carga (Cuevas Acuña et al., 2024; Rosasco & Perini, 2019; S. Wilkinson & Feitosa, 2015). En contraste, los inmuebles como centros comerciales, hospitales, almacenes y naves industriales cuyas estructuras con techos amplios y planos (Y. Wang et al., 2023) representando posibles espacios estratégicos para la instalación de techos verdes.

Aunque el potencial total teórico a cubrir el 79% de la superficie construida de la CDMX con TVLE se considera como una oportunidad prometedora para aumentar las AVU, su implementación está sujeta a aspectos técnicos, geográficos,

normativos y económicos. Asimismo, la instalación de techos verdes no sustituye por completo la función de los AVU convencionales a nivel de suelo (Mayrand & Clergeau, 2018), pero es una medida adicional que permite mantener o reducir la velocidad de pérdida en la disponibilidad per cápita (Joshi & Teller, 2021; Mihalakakou et al., 2023).

Si bien el incremento proyectado por la adopción de TVLE ayudaría en la captura de CO₂, además de la producción de co-beneficios relacionados con la regulación térmica, la eficiencia energética y la mejora de la calidad ambiental en zonas urbanas con alta densidad. Esto no es suficiente para alcanzar el estándar establecido en la normativa local, además de ser limitado considerándolo como la única estrategia para aumentar AVU, a pesar de ello si contribuye a compensar la pérdida de cobertura vegetal en el contexto de la CDMX donde la expansión urbana limita la creación de nuevas áreas verdes a nivel superficial.

Según el siguiente análisis temporal con indicadores de sustentabilidad urbana: población, techos verdes y AVU (Figura 35), muestra una disparidad entre ellos. Mientras que los dos primeros muestran tendencias crecientes, el indicador de AVU real por habitante se mantiene por debajo del umbral de 9m²/hab. requerido por la normatividad de la CDMX.

El aumento en el AVU real por habitante observado entre 1999 con 5.27 m²/hab y 2007 con 8.01m²/hab, no obedece a una creación masiva de nuevos espacios verdes de uso público, sino a una redefinición metodológica de las áreas verdes urbanas. Una conceptualización que sumó al inventario oficial polígonos de valor ambiental, como barrancas y ciertas áreas del Suelo de Conservación (Núñez, 2021).

La dificultad para alcanzar el estándar de 9m²AVU/hab. reside en la restricción territorial de la CDMX. Esta limitación espacial se intensifica por la tendencia a la densificación urbana cuya expansión hacia zonas protegidas o rurales es impulsada

por el crecimiento demográfico y las presiones socioeconómicas (Aguilar, 2008; Aguilar et al., 2022; de la Luz Hernández-Flores et al., 2017).

Las ciudades alrededor del mundo, así como la CDMX, se caracteriza por una alta concentración poblacional en espacios reducidos (Sassen, 2005). Históricamente, dinámica urbana prioriza la infraestructura gris y la habitación sobre el espacio verde, lo que genera una presión constante a la baja sobre el AVU disponible per cápita (Colding et al., 2020; Hu et al., 2024; Muhamad Nor et al., 2021).

Con estos datos de territorio y población, se observa un crecimiento en la implementación de los techos verdes, lo cual puede ser aprovechado como una estrategia para aumentar la superficie verde sin requerir una expansión horizontal. Sin embargo, su desarrollo en estas últimas dos décadas no ha logrado compensar la escasez de AVU hasta el estándar ideal.

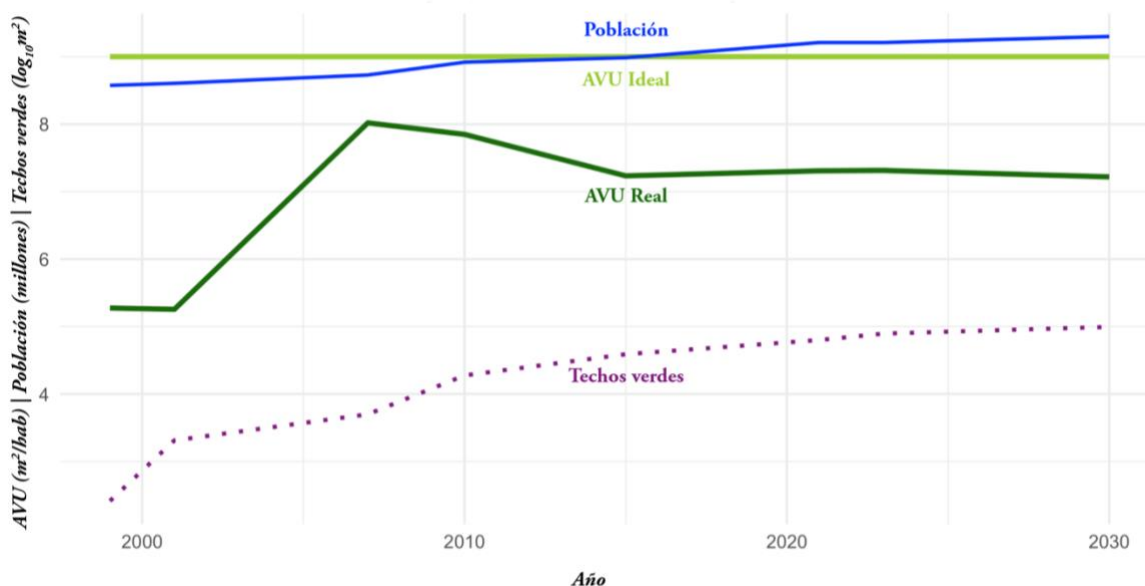


Figura 35. Evolución y proyección de indicadores sustentabilidad en CDMX

Como se ha mencionado a lo largo del numeral 2, las SbN integradas en la arquitectura como herramientas de adaptación al cambio climático en diversas ciudades. En el contexto de la densificación urbana y la restricción territorial las políticas públicas a nivel internacional han orientado la incorporación de SbN en los edificios. Esta tendencia se basa en estudios recientes y marcos de planificación abogan cada vez más por la integración de la infraestructura verde en el desarrollo urbano para equilibrar los SE, la resiliencia y la habitabilidad (Bai et al., 2022; Li et al., 2024; Semeraro et al., 2021; Tansar et al., 2023; Yang & Lee, 2021).

La adopción y promoción de TVLE en la CDMX debería seguir el diseño urbano internacional en donde se reconoce la incorporación de la vegetación en la estructura construida como un mecanismo necesario para la adaptación a los efectos del cambio climático.

5.3 Impacto Social

5.3.1 Frecuencia de visita a los sitios con techos verdes

La entrevista semi estructurada se aplicó en el período de agosto a noviembre del 2024 a 69 personas (Anexo 2). La Tabla 20 describe la distribución de este total en los grupos de usuarios y responsables. Los tipos de usuarios se clasifican según el sitio: estudiantes o profesores pertenecientes de la ASF, visitantes al JB, al PLM, usuarios externos y trabajadores del INFONAVIT.

Tabla 19. Distribución de la cantidad de personas entrevistadas

Sitio	Cantidad y tipo de usuario	Cantidad de responsables
JB - UNAM	5 visitantes externos.	1
	5 trabajadores	
ASF	10 estudiantes	2
	10 profesores	
INFONAVIT	10 trabajadores	5
	10 visitantes externos	
PLM	10 visitantes externos	1

Según la Figura 36, elaborada a partir de la información recopilada de los 60 usuarios se observa que la frecuencia de visita varía desde visitas semanales hasta visitas muy esporádicas cada varios años. Esto demuestra una diversidad en el uso y la frecuencia de interacción con estos espacios según los diferentes grupos. Del total de usuarios, el 25% corresponde a aquellos que visitan diariamente los techos verdes del PLM, Jardín Botánico y los trabajadores del INFONAVIT. El 22% está compuesto por alumnos de la ASF y visitantes del PLM quienes solo una vez al año asisten a los techos verdes.

En tres grupos, cada uno conformado con un 10% del total, el primer grupo incluye usuarios de la ASF, del PLM y trabajadores del INFONAVIT, quienes visitan los techos verdes de 3 a 4 veces a la semana. El segundo grupo visitan de 2 a 3 veces al año los techos verdes de la ASF y del PLM. El tercer grupo son los visitantes externos del INFONAVIT que realizan su primera visita al techo verde.

En otros tres grupos, cada uno compuesto por el 5% del total de usuarios, el primer grupo de trabajadores del INFONAVIT quienes visitan semanalmente los techos verdes. El siguiente grupo también incluye los trabajadores del INFONAVIT y del PLM que visitan de 2 a 3 veces a la semana los techos verdes. Finalmente, el último grupo está conformado por profesores de la ASF, que visitan anualmente los techos verdes de 6 a 8 veces.

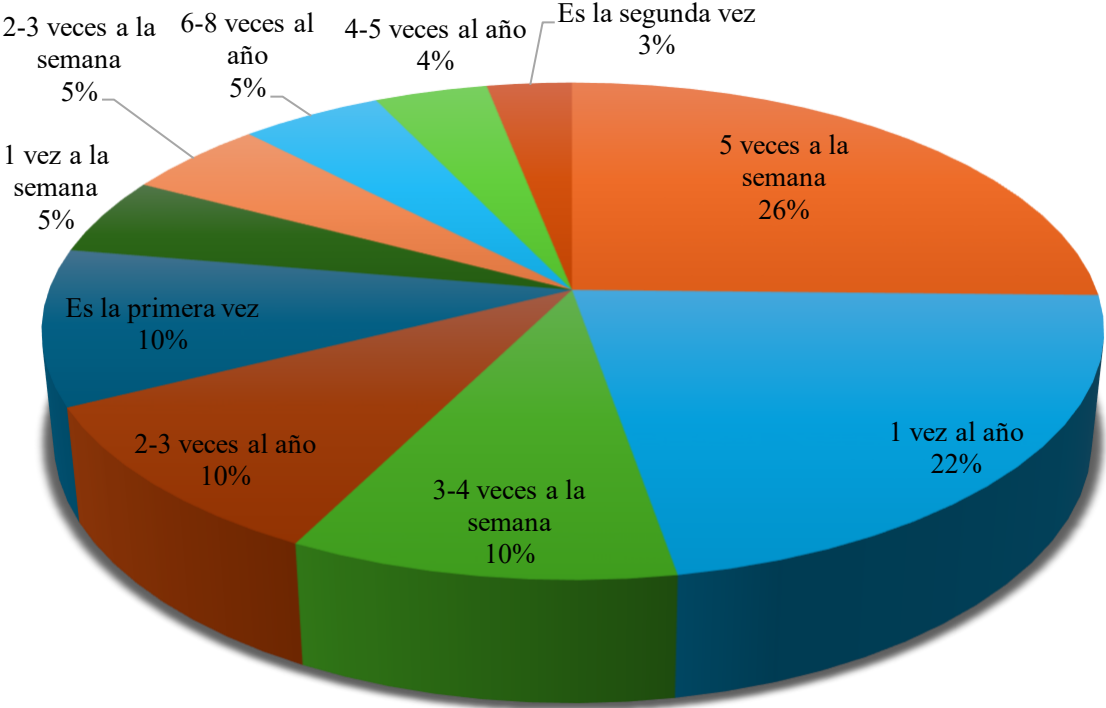


Figura 36. Frecuencia de visita de los usuarios

5.3.2 Comprensión y percepción de los techos verdes en la CDMX

La primera parte del análisis de las respuestas, mediante una nube de palabras generada con MAXQDA, permite caracterizar el grado de conocimiento del techo verde conceptualmente como una base para comprender la percepción social. A partir del cual se definieron 17 códigos: “fauna”, “vegetación”, “zona urbana”, “cambio de paisaje”, “construcción”, “sustentable”, “medio ambiente”, “beneficios”, “hacer”, “sembrar”, “arriba”, “áreas verdes”, “espacios” y “azotea/techo”. Las interpretaciones varían según el contexto de los entrevistados, desde la apreciación estética hasta su función ecológica.

percepción directa del concepto, posiblemente ligada al mantenimiento de la apariencia visual de la vegetación.

“El techo verde cuenta con 20 áreas en las que les llamamos islas, en donde tenemos diferentes tipos de plantas. Aquí básicamente tenemos lo que son suculentas del grupo de lo que son las crasuláceas son plantas muy carnositas que pueden este resistir bastante lo que es la falta de agua una vez que llueve, parece que están muriendo en temporadas de secas y ahorita llueve y se ve, ahorita está muy bonita la verdad...Este lugar, es el hospedero de muchas especies de insectos. Tenemos escarabajos catarinas, hay aves que comen las larvitas de los escarabajos. Entonces se crea un círculo bastante bueno. Tenemos aves, tenemos escarabajos, tenemos caracoles.” – Responsable PLM

En cambio, en el Jardín Botánico, se destacan tres aspectos diferentes: el cambio de paisaje, el impacto en el medio ambiente y el aprovechamiento del espacio. Esta perspectiva indica una comprensión enfocada en la transformación visual, el impacto ambiental y el uso funcional de estos techos.

“Pues el caso de aquí, pues uno lo ve como parte que ya se integró a la reserva de la biosfera del pedregal de San Ángel. La idea es que no, no viéramos un techo de cemento o de este de carpetas asfálticas o cosas así en las azoteas. Y que viéramos algo continuo y además de regresarle un pedacito a la fauna que le hemos robado, los humanos le quitamos siempre los espacios y en este caso, pues ya tiene por lo menos si no es así, lo natural, pero está funcionando porque está lleno de aves consumiendo tunas o consiguiendo insectos.” – Responsable Jardín botánico

Por su parte, tanto los responsables de la ASF como del Infonavit consideran siete elementos de los 17 identificados previamente en la codificación. Sin embargo, aquí se resaltan los beneficios derivados de los techos verdes, mostrando una mirada hacia las ventajas y utilidades que estos ofrecen. Por otro lado, los responsables del Infonavit lo consideran como un resultado directo de la construcción, lo que indica una percepción orientada hacia la implementación física y la naturaleza estructural de estos espacios.

“...principalmente, además de los beneficios de propagación de insectos de atracción de fauna silvestre de polinizadores, de reducción del efecto de islas de calor, de la reducción de la erosión en el techo por la lluvia, creo que la principal razón, pues es la parte educativa, no porque los alumnos pueden dentro del Colegio tener un área prístina donde casi no hay un impacto humano.” – Responsable #2 ASF

“principalmente porque una azotea verde a nosotros como seres vivos nos da algo que se llama recurso ecosistémico, no que son como todos los beneficios que nos puede dar un aire más limpio.” – Responsable #2 INFONAVIT

En las matrices de calor (Figura 38) se observa el comportamiento de las respuestas de los usuarios quienes relacionan con mayor frecuencia los "espacios" con un 47.5% con lo que significan los techos verdes como áreas que pueden ser utilizadas de manera versátil y multifuncional dentro de entornos urbanos. Así mismo, según la codificación con porcentaje del 33.9% se encuentra "azotea/techo", señalando la ubicación específica considerando ambas palabras para hablar sobre esta SbN.

Los códigos "plantas", "vegetación" y "sembrar" con un 42.4%, 23.7% y 13.6% respectivamente representa el enfoque de los usuarios a notar la presencia de flora a partir del acto de plantar o cultivar en estos espacios exclusivos para ello.

Por otro lado, se observa que los códigos "Fauna", "Vivo", "Cambio de paisaje", "Construcción", "Sustentable", "Hacer" y "Arriba", aunque tienen una representación limitada en las descripciones del significado de techo verde, muestran aspectos específicos de la percepción de los usuarios sobre estos espacios.

Los usuarios hicieron referencia "Fauna" y "Vivo", en menor frecuencia, a pesar de ello esto indica la consideración de la vida en los techos verdes, sugiriendo una conciencia sobre la biodiversidad y la vitalidad de estos entornos. Esto puede significar un interés en el ecosistema creado por la presencia de fauna y flora en estas áreas.

El término "Cambio de paisaje" resalta la percepción a nivel visual de los usuarios que los techos verdes tienen un impacto estético en los entornos urbanos. Esto podría indicar una apreciación por la transformación y la mejora del panorama cotidiano urbano mediante la presencia de esta SbN.

En relación con lo anterior, se encuentra "Construcción", esta palabra sugiere que los usuarios entienden a los techos verdes como una forma de intervención o modificación en edificaciones existentes, lo que podría indicar una visión de estos espacios como parte integral de la estructura urbana.

Aunque con una representación relativamente baja, la presencia de "Sustentable" sugiere una percepción de los techos verdes como una solución ecológica que aporta al desarrollo del medio ambiente, la economía y la sociedad de las ciudades.

Por último "Hacer" y "Arriba" tienen una baja frecuencia, lo que podría indicar que la acción de crear o implementar techos verdes y su ubicación elevada en los edificios no es un tema central en la descripción de un techo verde.

La concepción de los visitantes del PLM sobre el techo verde, se distingue de los demás grupos como aquellos con mayor diversidad de descripción, lo anterior se podría deber a que la mayoría son ambiguas por una incertidumbre sobre la definición. A pesar de ello se destaca la noción de los techos verdes como espacios potenciales para la generación de áreas verdes útiles en entornos urbanos.

“Pues se utiliza en la construcción, se está utilizando para tener más áreas de permeables y de esa manera también poder construir más yo como ingeniero civil, hacemos áreas verdes para poder construir más y de alguna manera, pues los techos verdes te dan oportunidades de construir más espacios y te lo toman como áreas verdes.” – Usuario #1 PLM.

“No sé, primera vez que oigo eso que sé a qué se refiere eso, que en las azoteas ponen las matas y siembran. Y qué sé yo, ajá, exactamente. Ah, bueno, no, no, bueno, me lo imagino, pero no sé nada de eso.” – Usuario #3 PLM.

“Es un espacio del techo para pues me imagino sembrar. Así me lo imaginé yo no tener este algún cultivo, plantas, algo que ayude a producir algo, o al menos que haya más árboles más vegetación.” – Usuario #6 PLM.

En un contexto escolar, la explicación de los estudiantes de la ASF se enfoca hacia la flora resaltando su función como un refugio para la biodiversidad y los profesores hacia los beneficios personales y ambientales que provee el techo verde, en ambos casos haciendo énfasis en la función de este espacio como para interactuar con la naturaleza una zona libre para la protección de plantas en peligro de extinción, con potencial como un lugar para la reflexión y el disfrute personal.

“Techo verde es como un ambiente con muchas plantas, mucha fauna, tal vez hay abejas, bichos, pero también acá en la escuela hay unas plantas que están en peligro de extinción, entonces también las guarda y las cuidan.”- Estudiante #10 ASF

“Ok, este es el primer lugar donde los veo, cuando vine por primera vez a mi entrevista, la persona que me entrevistó me llevó al techo verde, y me dijo que es un lugar tranquilo, y me contó más sobre las especies exclusivas de México, pero principalmente que es un lugar que se puede aprovechar para estar solo.” - Profesor #5 ASF

En el caso de los usuarios del Jardín Botánico, dentro de sus descripciones incluyen mayormente en distintas combinaciones elementos bajo la codificación de “azotea/techo”, “plantas”, “espacios” y “construcción”. Lo cual presenta una variedad de enfoques sobre los techos verdes: desde la adaptación de espacios artificiales en la infraestructura construida para fomentar la biodiversidad hasta la visión de un ecosistema preservado en un entorno urbano con funciones a partir de la inclusión de la vegetación.

“Un espacio, pues sí, artificial que se intenta adaptar este para este seguir generando esas conexiones de biodiversidad. Ahora sí que no, no solamente la infraestructura gris, sino ya incluir esta parte ecológica.” – Usuario #2 Jardín botánico

“Es un modelo arquitectónico donde hay una serie de plantas, no sé si con algún diseño en específico también depende de las características del edificio o no sé qué quieran poner” – Usuario #9 Jardín botánico

“Es una forma de preservar. Un ecosistema que en la ciudad donde es un espacio urbano que es difícilmente ocupado por plantas.” – Usuario #11 Jardín botánico

En las respuestas de los usuarios tanto internos como externos sobre la definición de techo verde del Infonavit coinciden que es un espacio de aprovechamiento para realizar actividades los visitantes externos se centran en la funcionalidad y el uso práctico del espacio para actividades específicas como la agricultura y para la mejora del medio ambiente al aumentar las AVU. Mientras que las descripciones de los usuarios internos son a nivel personal en donde destacan el impacto que les proporciona este lugar, más allá de su utilidad práctica.

“Pues es prácticamente como un techo donde pues se practican ciertas actividades, como pues cultivación de plantas, composta donde se tiene como estas áreas verdes que pues hacen que pues se aproveche este espacio.” - Usuario Externos #10, Infonavit

“Para mí es un centro de este de pasividad, es tiempo para mi persona y es tiempo para mi cuerpo y es un espacio libre donde lo puedes disfrutar como tú quieras.” - Usuario Interno #5, Infonavit

El nivel de conocimiento refleja una diversidad de enfoques sobre el concepto de los techos verdes, desde la funcionalidad práctica hasta la importancia personal y

el impacto ambiental, mostrando cómo diferentes grupos de usuarios atribuyen significados y valoraciones distintas a estos espacios verdes urbanos.

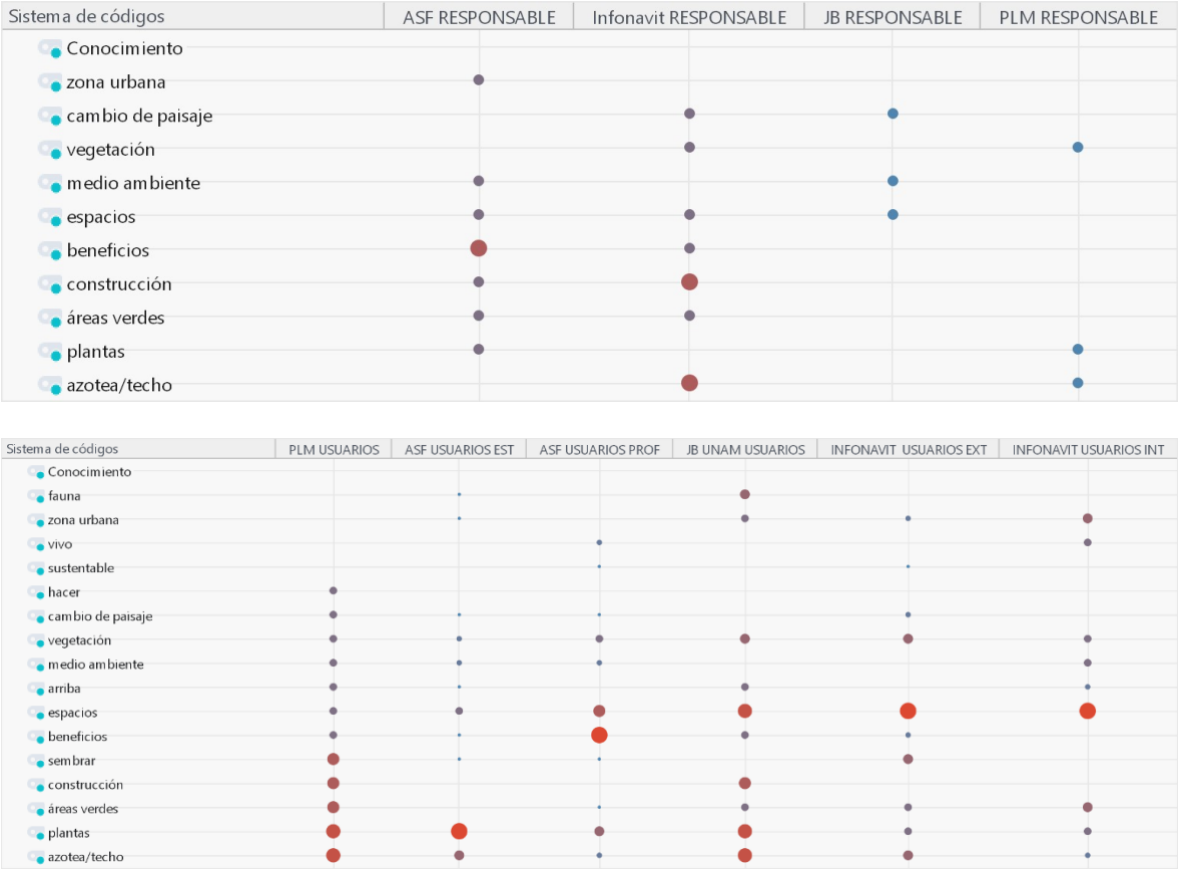


Figura 38. Matriz del conocimiento de los responsables y usuarios

Los visitantes del PLM muestran una interpretación ambigua y diversa, destacando el potencial de estos techos para generar áreas verdes útiles en la ciudad. En el ámbito escolar, estudiantes y profesores resaltan la función de los techos verdes como refugio para la biodiversidad y espacio de interacción y reflexión. Por su parte, los usuarios del Jardín Botánico conciben estos espacios como una adaptación de infraestructuras artificiales que fomenta ecosistemas urbanos, lo que confirma la amplia y multifacética comprensión del concepto de techo verde en entornos urbanos.

La comprensión de los techos verdes abarca múltiples dimensiones, reflejadas tanto en las respuestas de responsables como de usuarios. Esta diversidad en la conceptualización se manifiesta en la forma en que se articulan los beneficios, las emociones y las percepciones, estableciendo una base sólida para comprender la experiencia integral de estos espacios.

La siguiente parte del análisis, permitió identificar 20 beneficios al medio ambiente, 17 emociones y 14 percepciones a partir de la implementación de un techo verde, con interdependencias entre las mismas. Los beneficios ambientales, como la disminución de temperatura o la presencia de fauna, pueden generar emociones como tranquilidad o relajación (Alqahtany, 2022). En tanto que, si un usuario asocia los techos verdes con emociones positivas, como paz o alegría, es probable que su percepción sea favorable en términos estéticos o de aprovechamiento del espacio (Loder, 2014). De la misma forma, los responsables priorizan el valor económico y los usuarios el valor estético, esto demuestra la utilidad percibida influye en la evaluación del beneficio (Vanstockem et al., 2018).

Tabla 20. Beneficios, emociones y percepciones (R: Responsables; U: Usuarios)

Beneficio	R	U	Emoción relacionada	R	U	Percepción relacionada	R	U
Disminución de temperatura	13.90%	10.70%	Preocupación	38.89%	9.45%	Valor económico	21.05%	1.20%
Fauna	13.90%	4.30%	Relajación (+)	22.22%	13.39%	Aprovechamiento	21.05%	14.46%
Captación agua pluvial	11.10%	7.90%	Tranquilidad(+)	16.67%	18.11%	Espacio recuperado	15.79%	12.05%

Generación de oxígeno	8.30%	16.40%	Cotidiano	11.11%	2.36%	Impacto ambiental	15.79%	4.82%
Más verde	8.30%	5.70%	Paz (+)	5.56%	15.75%	Falta difusión	5.26%	1.20%
Reducción GEI	8.30%	4.30%	Alegría (+)	5.56%	6.30%	Único/Singular	5.26%	8.43%
Espacio para polinizadores	5.60%	2.90%	Felicidad (+)	0.00%	7.09%	Valor estético	5.26%	25.30%
Huerto urbano	5.60%	5.70%	Agradable (+)	0.00%	5.51%	Armonioso	10.52%	6.02%
Mejora temperatura interna	5.60%	2.90%	Calma (+)	0.00%	4.72%	Diferente	0.00%	10.84%
Preservación de vegetación	5.60%	11.40%	Interés	0.00%	4.72%	Inusual	0.00%	4.82%
Espacio libre	4.30%	0.00%	Tristeza	0.00%	2.36%	Especial	0.00%	3.61%
Actividades	2.80%	2.90%	Serenidad (+)	0.00%	2.36%	Moderno	0.00%	3.61%
Tiempo de vida impermeabilizante	2.80%	0.00%	Asombro	0.00%	1.57%	Fantástico	0.00%	2.40%
Mejora la estética	2.80%	2.90%	Esperanza (+)	0.00%	1.57%	Falta mantenimiento	0.00%	1.20%
Reducir CO₂	2.80%	7.10%	Fresco	0.00%	1.57%			
Servicio ecosistémico	2.80%	2.90%	Cansado	0.00%	1.57%			
Ahorro de energía	0.00%	3.60%	Bienestar (+)	0.00%	1.57%			
Captura de carbono	0.00%	1.40%						
Formación de suelo	0.00%	0.70%						
Natural	0.00%	2.10%						

Esto coincide con los beneficios mencionados tanto por usuarios como por responsables que son enfocados en el impacto ecológico generados por los techos verdes (Nguyen Dang et al., 2023) . Los responsables tienen un enfoque en la eficiencia ambiental y de la infraestructura al indicar la disminución de temperatura (13.9%), la presencia de fauna (13.9%) y la captación de agua pluvial (11.1%), como los principales beneficios ambientales. En tanto que los usuarios consideran a la generación de oxígeno (16.4%) y la preservación de la vegetación (11.4%).

En términos emocionales, el 63.20% de las emociones identificadas son positivas (+), de las cuales los usuarios respondieron en un 76.39%, indicando tranquilidad (18.11%), paz (15.75%) y relajación (13.39%) como las principales, esto coincide con la determinación de los techos verdes que contribuyen al bienestar social en general (Haksever & Markoc, 2020; Nguyen Dang et al., 2022). En cambio, los responsables, aluden a la preocupación (38.9%), posiblemente debido a aspectos económicos y de gestión (Liberalesso et al., 2020; Vanstockem et al., 2018), a pesar de esto, también manifiestan emociones positivas (Rezaei et al., 2021) como relajación (22.2%) y tranquilidad (16.67%).

La ausencia de declaración de emociones positivas por parte de los responsables de los techos verdes puede explicarse por factores relacionados con su rol en la gestión y mantenimiento de estos espacios (Ferreira et al., 2021; Laforteza et al., 2018), a pesar de esto mencionan que es necesario incrementar las AVUs en la CDMX y está es una forma de realizarlo.

“...la idea es que haya como justo con esta parte de resarcir un poco el hecho de que haya tantos edificios y no tener tanta área verde implica que va a haber menos humedad y por lo tanto menos lluvia, ¿no? Y pues obviamente también va a beneficiar a las construcciones, porque digamos que es menos bueno, menos impuestos y todo esto toda esta parte...” – Responsable #5 INFONAVIT

La prevalencia de sentimientos de tranquilidad, paz y relajación entre ambos grupos sugiere un ambiente que fomenta la calma, la serenidad, tranquilidad mental, confirmado que este tipo de SbN ofrece contacto con la naturaleza que reduce el estrés (Hunter et al., 2019; Nguyen Dang et al., 2022).

Acerca de la percepción hacia los techos verdes, los responsables priorizan el valor económico (21.05%), considerándolos una inversión asociada con el ahorro energético derivado de su capacidad de aislamiento térmico, que reduce la demanda de calefacción y refrigeración en los edificios (Berardi et al., 2014; Chow & Bakar, 2019; Francis & Jensen, 2017). Además el incremento del valor del inmueble, como sucede con aquellos que integran un tipo de SbN (Bockarjova et al., 2020; Mutlu et al., 2023). Además del aprovechamiento del espacio (21.05%), indica que los responsables los ven como una estrategia para optimizar áreas en

los edificios, transformándolas en espacios productivos o funcionales espacios, en la CDMX en donde el espacio a nivel de piso cada vez se ha vuelto más limitado (Calheiros & Stefanakis, 2021; Wooster et al., 2022).

En tanto que los usuarios destacan su valor estético (25.3%), seguido también de su percepción como un espacio aprovechado (14.46%) y recuperado (12.05%). Además de reconocer su singularidad (10.84%) percibiendo al techo verde como un elemento diferenciador en el paisaje urbano. Esto coincide con el aprecio a la mejora estética que aportan los techos verdes, lo que puede ser un generador de sentimientos de bienestar y promover beneficios para la salud mental (Cohen-Cline et al., 2015; Haksever & Markoc, 2020; Nguyen Dang et al., 2023; Rezaei et al., 2021).

Referente a la conciencia los usuarios internos como trabajadores o estudiantes del Infonavit, la ASF y el Jardín Botánico, la mayoría de los usuarios tiene plena consciencia de la existencia de techos verdes y los asocian con beneficios ambientales funcionales. En tanto que los responsables, son el grupo que por su rol tienen la mayor consciencia, obtenida cuando comenzaron a laborar en estos espacios.

En tanto que el menor grado (36.21%) fue reportado por los usuarios visitantes ocasionales del Infonavit y del Parque La Mexicana quienes previo a la visita a los respectivos sitios no reconocen la existencia de techos verdes en el entornos de estudio. Cuando se les preguntó si sabían que se encontraban en proximidad a un techo verde, la respuesta fue negativa, en cambio, consideran estos espacios como otro tipo de área verde: jardinera o huerto urbano.

Estos resultados revelan una discrepancia en el reconocimiento de la presencia de techos verdes, lo que plantea una situación paradójica en la que la cercanía física no se traduce en la percepción consciente de dichos elementos. Tanto usuarios como responsables (5.26%-1.2%) reconocen la necesidad de difusión de esta SbN (Nguyen Dang et al., 2023) para que por medio de diversas estrategias de divulgación se amplie el conocimiento y la aceptación de estos espacios (Hossain et al., 2019).

Respecto a la recomendación su adopción en la CDMX, tanto usuarios (98.3%) como responsables (100%) están de acuerdo en la necesidad de incrementar está SbN. El usuario (2%) que no respalda la expansión se vincula, a las condiciones actuales de infraestructura y a la situación de los inmuebles en la CDMX.

"No es factible en los techos por el tipo de construcción." – Usuario #2 PLM

A partir de las justificaciones para recomendar o no la adopción de techos verdes, se identificaron tanto ventajas como desventajas. Entre las ventajas, el principal argumento señalado por los usuarios (38.98%) y los responsables (26.32%) está relacionado con los beneficios ambientales, sociales y económicos que estos espacios proporcionan.

Las desventajas detectadas tanto de usuarios y responsables por los cuales los techos verdes no se implementan con mayor frecuencia son: la falta de planificación previa, problemas de normatividad, presupuesto y la necesidad de mayores recursos económicos.

Algunos responsables destacan la necesidad de proyectar con anticipación la integración de techos verdes en el diseño arquitectónico para garantizar su viabilidad.

"Si, siempre y cuando sea un proyecto pensado en el buen mantenimiento, al final del día los expertos no harán un milagro después de que esta el proyecto, si está bien elaborado, la paleta vegetativa y todo lo que viene después, por todos los beneficios que se tienen, siempre y cuando se esté pensado en el futuro." – Responsable #2 INFONAVIT.

Además, la ausencia de legislación obligatoria que promueva su uso limita su adopción a gran escala. Cabe destacar que de manera general se identifica una necesidad de crear políticas públicas y cambios regulatorios que fomenten la expansión de estos espacios (Pratama et al., 2023; Zaman & Lehmann, 2011; Zhang et al., 2021).

"...estaría totalmente de acuerdo en firmar una propuesta de ley que dijera que las casas tienen la obligación de tener cierto número de metros cuadrados de jardín o de techo verde." – Profesor #6 ASF.

“...siento que en algunos edificios o en los nuevos edificios deben implementar esto, pues más que nada por el impacto ambiental, yo siento que es algo muy importante en las grandes urbes como es Ciudad de México, entonces, pues sí, sí siento que sería como algo ya muy estricto, que tendrían que tener esto” – Visitante #7 INFONAVIT.

“...que puedan considerarse para reducción de impuestos, que se les dé una mayor promoción por parte del gobierno, ventajas fiscales” - Responsable #2 ASF

Así como el costo es una de las principales barreras para la implementación de techos verdes requieren una inversión inicial con sus respectivos costos de mantenimiento, lo que puede desalentar su adopción (Liberalesso et al., 2020; Teotónio et al., 2018). El 21.05% de los responsables considera que el factor económico es clave en la toma de decisiones sobre techos verdes. Si bien existe conocimiento de los beneficios de los techos verdes, la disposición a pagar por su instalación y mantenimiento es limitada (Cristiano et al., 2023).

El estudio indica que los techos verdes son percibidos principalmente como una alternativa ambiental y ecológica favorable, a pesar de las diferentes perspectivas de los gestores y usuarios, con impactos en la disminución de la temperatura y la biodiversidad. Provocan sentimientos positivos como calma y relajación, aunque hay una preocupación que permanece. En relación a la percepción, se evalúan sobre todo desde un punto de vista económico y estético, subrayando su importancia en la optimización del espacio y la elevación del entorno urbano. Los resultados favorables obtenidos de la experiencia con techos verdes reflejan una amplia aceptación social, lo que promueve la adopción de los techos verdes.

5.3.3 Análisis comparativo de estrategias y enfoques para la implementación de techos verdes

El análisis comparativo se presenta en la Tabla 22 con las estrategias y enfoques adoptados en relación con sus objetivos de política, incentivos financieros, roles y responsabilidades, y los tipos de techos verdes incentivados con la finalidad de visualizar de manera integral las diferentes aproximaciones y niveles de avance en la adopción e identificar buenas prácticas y áreas de oportunidad para futuras políticas urbanas.

Tabla 21. Estrategias y enfoques de las políticas públicas para la implementación de techos verdes

Criterios	País										
	ARG	BRA	CHIL	COL	MEX	EUA	CHI	ESP	POR	CAN	
Objetivos de política	Reducción de contaminación atmosférica	X	X		X	X	X	X	X	X	X
	Eficiencia energética	X		X			X	X	X		
	Fomento a la biodiversidad	X	X	X	X				X	X	X
	Mitigación de islas de calor	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Adaptación al cambio climático			X	X	X	X	X			X
	Reducción de inundaciones	X	X	X	X					X	X
	Reducción de ruido				X					X	
Incentivos financieros	Subsidios costos de instalación				X		X		X		X
	Descuentos en impuestos	X					X	X			X
	Créditos fiscales						X				
	Incentivos							X		X	X
Roles y responsabilidades	Sector privado	X	X		X	X	X	X	X	X	X
	Sector público	X		X	X		X	X	X	X	X
Tipos de techos verdes incentivados	Intensivo			X		X	X	X		X	X
	Extensivo	X		X		X	X	X	X	X	X
	Semi-intensivos					X	X	X	X		

En primera instancia, se revisan los objetivos de política, donde se establecen beneficios ambientales como la mitigación de islas de calor, la eficiencia energética y la adaptación al cambio climático. En segundo lugar, se consideran los incentivos financieros implementados, tales como subsidios, descuentos fiscales y otros apoyos económicos que buscan facilitar la instalación de techos verdes. En tercer lugar, se evalúan los roles y responsabilidades de los sectores público y privado,

señalando el grado de involucramiento y la colaboración entre estos actores. Por último, se examinan los tipos de techos verdes incentivados, diferenciando entre techos intensivos, extensivos y semi-intensivos.

En los países analizados, se observa un objetivo común orientado a la reducción de la contaminación atmosférica y la mitigación de las islas de calor. Esta coincidencia refleja la importancia de los techos verdes como una SbN para mejorar la calidad del aire urbano y reducir las temperaturas en áreas densamente pobladas (Liu, H. et al., 2021; MacIvor et al., 2016) . Uno de los efectos de estos sistemas es disminuir la demanda de energía para enfriamiento (Aboelata, 2021; Castleton et al., 2010; Pérez et al., 2012), adaptando la ciudad y su habitabilidad a los efectos del cambio climático.

En términos de eficiencia energética, países como Argentina, Chile, EUA, China, y España han priorizado este objetivo. La implementación de techos verdes en estos contextos muestra un interés por reducir el consumo de energía mediante el aislamiento natural que ofrecen estas SbN. Por otro lado, el fomento a la biodiversidad es un enfoque que se observa en Argentina, Brasil, Chile, y algunos países europeos como España y Portugal. Estos países han implementado políticas que buscan promover la biodiversidad urbana mediante la creación de hábitats para especies locales en los techos verdes, además, contribuye a la resiliencia de los ecosistemas urbanos.

Por último, el manejo del agua de lluvia es una prioridad en Argentina, Brasil, Chile, y Portugal, donde los techos verdes se utilizan como una medida para reducir el riesgo de inundaciones. A través de la absorción y retención del agua, estos sistemas ayudan a mitigar el impacto de las lluvias (Baryła et al., 2018; Speak et al., 2013; Wang et al., 2021).

Los países que han implementado subsidios para los costos de instalación de techos verdes son México, China y Canadá, con el objetivo de facilitar su adopción y reducir las barreras económicas para los propietarios de inmuebles. Estos subsidios buscan cubrir parte del gasto inicial, incentivando a que más personas opten por esta solución sustentable. La implementación de estos apoyos

económicos es clave para promover la infraestructura verde, dado que los costos iniciales pueden ser un obstáculo para su instalación.

En tanto que para los casos de Argentina, EUA y Portugal, se han implementado descuentos en impuestos como una estrategia para fomentar la adopción de techos verdes. Estos beneficios fiscales incluyen reducciones en los impuestos a la propiedad o exenciones temporales, lo que resulta atractivo para los propietarios de edificios que desean reducir sus gastos a largo plazo, con una reducción de la carga tributaria.

China es el único país en este análisis que ha adoptado un esquema de créditos fiscales como incentivo específico para la instalación de techos verdes. Esta estrategia está alineada con el enfoque del país en fomentar la innovación tecnológica y la sustentabilidad. Los créditos fiscales ofrecen a las empresas y propietarios la oportunidad de deducir una parte del costo de la instalación de techos verdes de sus impuestos, lo que puede ser particularmente atractivo en proyectos de gran escala, incentivando el desarrollo urbano verde.

Además de subsidios y créditos fiscales, países como Portugal y Canadá han implementado incentivos financieros alternativos, como opciones de financiamiento a bajo interés. Estos incentivos permiten que los propietarios accedan a préstamos con tasas reducidas, facilitando la financiación de los costos iniciales. En conjunto, estas políticas reflejan un enfoque diverso en el apoyo económico para la adopción de techos verdes, dependiendo de los contextos locales y las prioridades de cada país. Mientras que los subsidios y los descuentos fiscales buscan reducir costos inmediatos para los propietarios, los créditos fiscales y el financiamiento a bajo interés ofrecen beneficios a largo plazo y promueven la inversión continua en soluciones verdes. Estas estrategias no solo incentivan la instalación de techos verdes, sino que también destacan la creciente importancia de las políticas públicas orientadas a la implementación de SbN en zonas urbanas para la adaptación al cambio climático.

La adopción de techos verdes enfrenta una serie de barreras y limitaciones que han dificultado su expansión, a pesar de las múltiples oportunidades a partir de los

beneficios ambientales, económicos y sociales que ofrecen. La percepción sobre estos espacios varía entre usuarios y responsables, lo que genera diferencias en su valoración y en la prioridad que se les otorga. Mientras que los responsables se enfocan en los aspectos técnicos, económicos y de mantenimiento, los usuarios los relacionan principalmente con su valor estético, ambiental y emocional. Esta divergencia impacta en la demanda social por aumentar la cantidad de techos verdes y en la disposición a fomentar su expansión. A su vez, la falta de información y difusión limita la comprensión de sus beneficios y restringe su adopción.

5.3.4 Desafíos y oportunidades en la implementación

En la Figura 39, se presentan los principales factores que condicionan su implementación. En la parte central, se sitúan los aspectos relacionados con la conciencia sobre los techos verdes, donde destacan elementos como la falta de difusión e información, las diferencias en la percepción entre usuarios y responsables, y la valoración estética frente a la funcionalidad. La forma en que las personas conocen y entienden los techos verdes es determinante para su aceptación (Nguyen Dang et al., 2023). Además, se incluye la captación de agua pluvial, un beneficio que, a la vez, requiere de un conocimiento técnico específico para ser aprovechado.

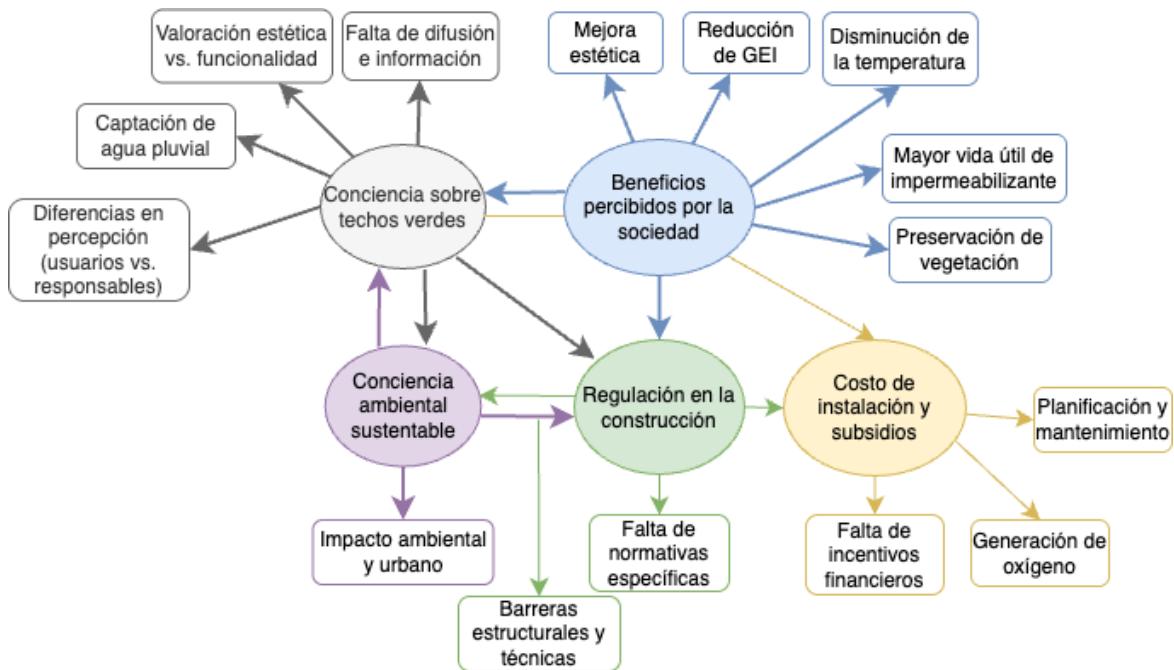


Figura 39. Interacciones entre barreras y beneficios percibidos en los techos verdes

En paralelo, se observa la conciencia ambiental sustentable, que se conecta con las barreras estructurales y técnicas, lo que indica que, incluso cuando existe una voluntad de mitigar el cambio climático o mejorar la calidad del aire, la falta de infraestructura adecuada o la ausencia de soluciones técnicas pueden frenar la implementación de techos verdes. La regulación en la construcción, el costo de instalación y subsidios son ejes críticos. Por un lado, la falta de normativas específicas demuestra que, los techos verdes no están contemplados de manera obligatoria, lo que dificulta su amplia incorporación. Aunado a una ausencia de incentivos financieros, la preocupación por la planificación y mantenimiento elevan la percepción del riesgo económico. Esta combinación de factores sugiere que la voluntad de construir techos verdes puede verse limitada si no existe un respaldo legal que promueva o exija su uso, ni un esquema de financiamiento que compense los costos iniciales.

Esto afirma que la conciencia ambiental no es suficiente por sí sola, se requiere un marco normativo y técnico (S. J. Wilkinson et al., 2024) que permita traducir la preocupación medioambiental en proyectos concretos. Una política pública sólida

que aborde tanto la parte legal como la económica para facilitar la adopción de esta infraestructura verde (Carter & Fowler, 2008; Liberalesso et al., 2020).

En la parte superior derecha se listan los beneficios percibidos por la sociedad, tales como la mejora estética, la reducción de GEI, la disminución de la temperatura, el aumento de la vida útil del impermeabilizante y la preservación de la vegetación. Estos aportes positivos contrastan con las barreras mencionadas, existe un potencial desaprovechado por los obstáculos normativos, económicos y de concienciación.

De acuerdo con lo descrito anteriormente, la divulgación y la educación son puntos de partida para que la sociedad considere los techos verdes como una alternativa viable y deseable en las ciudades. La adopción de techos verdes requiere un enfoque integral a partir de una planeación urbana coordinada, donde los objetivos sustentables con directrices para la construcción y mantenimiento de techos verdes.

5.3.5 Barreras identificadas para la implementación de techos verdes

La primera barrera identificada es la falta de regulación y políticas públicas en la CDMX y en todo México, podría cambiar a partir del desarrollo de una ley federal que establezca los requisitos mínimos para la instalación de techos verdes en nuevos desarrollos urbanos y rehabilitaciones de edificios existentes como se ha hecho en Nueva York y Lisboa (Cui et al., 2021; Municipio de Lisboa, 2023; New York City Mayor's Office of Environmental Coordination, 2024). Las políticas y normativas incentivan la adopción de techos verdes (Teotónio et al., 2021) ya que proporcionan un marco regulatorio que impulsa su implementación y asegura su integración en la planificación urbana.

A la par de esto, se deberían implementar ordenanzas locales en ciudades con vulnerabilidad al cambio climático como lo realizado a partir de la Bi-ley de Toronto (Canadá) o la Ordenanza Verde de Lisboa (Portugal) o como una estrategia de reducción del efecto de ICU, como lo ha hecho Chicago en su Plan de Sostenibilidad.

La siguiente barrera identificada son los altos costos de instalación y mantenimiento, dado que el desempeño financiero de los techos verdes puede ser bajo sin incentivos, considerar sus beneficios sociales y ecológicos en las evaluaciones económicas mejora su viabilidad (Manso et al., 2021; Teotónio et al., 2018, 2021). Para mitigar esto, se recomienda establecer deducciones fiscales para propietarios que instalen techos verdes, similar a los incentivos en Chicago y Toronto; aunado a incentivar el existente descuento al impuesto del predial en la CDMX a quien acredite contar con un techo verde (Artículo 296 Bis Del Código Fiscal, 2011).

Otra sugerencia en este aspecto es la creación de un fondo público de financiamiento para proyectos de infraestructura verde, siguiendo el modelo de la Estrategia de Edificios Verdes de Canadá. Así como ofrecer subsidios directos a edificios de interés social para la instalación de techos verdes, promoviendo equidad ambiental, como en los programas de financiamiento en Portugal. De igual modo se podrían fomentar alianzas público-privadas para compartir costos de implementación, como el modelo de financiamiento en España

La tercera barrera es la falta de integración de esta SbN en la planificación urbana, un diseño adecuado y un mantenimiento eficiente son fundamentales para maximizar los beneficios ambientales y sociales de estas iniciativas (Ode Sang et al., 2022; Park et al., 2022), por lo que su incorporación en estrategias de desarrollo urbano sustentable es clave. Se propone integrar techos verdes en la Estrategia Nacional de Adaptación al Cambio Climático o como parte de políticas de infraestructura verde sustentable, como lo ha hecho España con su Estrategia Nacional de Infraestructura Verde (2021) (Ecosistemas y Conectividad, 2021). Asimismo, se podrían convertir techos de escuelas, hospitales y edificios gubernamentales en techos verdes, como se ha hecho en Nueva York, Lisboa y Vancouver, asegurando que su diseño y mantenimiento sean óptimos para garantizar su efectividad a largo plazo (City of Vancouver, 2023; Cui et al., 2021; Lawler, 2009; New York City Mayor's Office of Climate and Sustainability, 2021).

La cuarta y quinta barreras son la falta de estándares nacionales y fragmentación en la implementación. Para ambos se sugiere la creación de un estándar nacional mexicano para techos verdes, tomando como referencia la ya existente NADF-013-RNAT-2007 para la CDMX, la NCh 3626:2020 de Chile y los códigos de construcción ecológica de EUA (New York City Mayor's Office of Environmental Coordination, 2024; State of California, 2022). Además, se propone el establecimiento de protocolos de monitoreo y mantenimiento que garanticen la efectividad de los techos verdes en la reducción de la temperatura y la captación de agua pluvial.

Las últimas barreras son la falta de conciencia pública y resistencia a la adopción. La experiencia ha demostrado que políticas de incentivos y estrategias de sensibilización pueden mejorar la adopción de techos verdes en entornos urbanos (Nguyen Dang et al., 2022; Teotónio et al., 2021). Por lo que se recomienda implementar programas de educación ambiental en escuelas y universidades para enseñar los beneficios de los techos verdes, como lo hace Brasil con su Política Municipal de Educación Ambiental en Recife (Institui A Política Municipal De Educação Ambiental E Dá Outras Providências., 2014). Aunado a esto, desarrollar campañas de difusión masiva con apoyo del gobierno, empresas y ONGs, promover la construcción ecológica (Green Roofs for Healthy Cities—North America Inc., 2015; Ode Sang et al., 2022).

5.4 Impacto económico del TVLE en la CDMX

5.4.1 ACB

La Tabla 23 presenta los datos base para el cálculo del ACB comparativo, a partir del desglose detallado de los costos asociados a los componentes principales utilizados en la instalación de un TVLE y un TVC. Se considera la inversión inicial, los diferenciadores entre ambos sistemas, tales como el tipo de impermeabilización, el drenante y el anti-raíz. Se especifican las capas por tipo de techo, el tipo de presentación comercial, el valor unitario, la cantidad requerida para cubrir la superficie objetivo, así como el costo por metro cuadrado (\$/m²) de cada componente.

Tabla 22. Comparativo de costos por capa constructiva: TVLE vs TVC

Tipo de TV	Capa	Presentación	Cantidad necesaria TVLE	Valor unitario (\$/m ² , 2025)
TVLE	Impermeabilizante con Anti-raíz	10 m ²	8.05 m ²	380.00
TVLE -TVC	Geotextil	418 m ²	8.05 m ²	72.48
TVLE	Drenante	40 kg	40 kg	-
TVLE -TVC	Sustrato	1 costal	15.5 costales	181.83
TVLE-TVC	Vegetación	1 planta	136 plantas	26.16
TVC	Impermeabilizante	10 m ²	8.05 m ²	328.99
TVC	Anti-raíz	10 m ²	8.05 m ²	245.38
TVC	Drenante convencional	37.8 m ²	8.05 m ²	181.06

De acuerdo con los resultados del 5.2.4 y la Tabla 24, se aplicó el proceso de ACB descrito en la sección 5.4.1. En los datos se observa que ambos tipos de techos verdes ofrecen beneficios por encima de la inversión inicial, pero el TVLE es económico al ser 25.9% más barato que el TVC, haciendo de este una opción accesible. Además el TVLE tiene una relación CB más alta, por cada peso invertido, este genera \$15.65 de retorno, en tanto que el TVC solo \$11.60, esto indica una posible mejora en la eficiencia económica a largo plazo. Siguiendo las fórmulas

Aunado a esto, el TVLE puede recuperar su inversión en 18 meses, mientras que el TVC en 24 meses.

Tabla 23. Comparativo resultados ACB: TVLE vs TVC

Tipo de TV	Costo total (6m ² , 2025)	Beneficio/Costo (MXN, 2025)	Período de recuperación (años)
TVLE	\$10,018.59	\$15.65	1.53
TVC	\$13,519.30	\$11.60	2.07

Siguiendo las fórmulas de la metodología 5.2.4 y las La Tabla 25 presenta el total del ahorro energético anual (kWh) y el estimado ahorro económico (MXN) por cada especie vegetal empleada en el TVLE. Las especies que brindan mayores ventajas en relación con la eficiencia energética y el rendimiento económico, son *S. pachyphyllum* y *S. nussbaumerianum* en tanto que *E. elegans*, tienen resultados desfavorables por su menor capacidad de reducción térmica.

Tabla 24. Ahorro energético y económico anual estimado por especie en el TLVE

Especie	Ahorro energético anual (kWh)	Ahorro Económico (MXN/m ² ·año)
<i>S. dendroideum</i>	806.211	\$ 967.84
<i>S. nussbaumerianum</i>	1480.626	\$ 1,777.46
<i>E. agavoides</i>	308.7	\$ 370.59
<i>S. pachyphyllum</i>	1751.13225	\$ 2,102.20
<i>E. elegans</i>	-52.82424	-\$ 63.41
<i>S. rubrotinctum</i>	965.79	\$ 1,159.41
<i>G. paraguayense</i>	801.423	\$ 962.09
Total	6061.06	\$ 7,276.18

A partir de estos datos, se seleccionaron las especies con mejor rendimiento descrito en el 5.1.5. La Tabla 26 resume los resultados del posible ahorro energético y económico en instalar TVLE en los sitios del apartado 5.2.5. De manera general considerando la disminución de uso de equipos de aire acondicionado se podría prevenir el uso de alrededor de 2.9 millones de kWh al año por disminuir y con ello producir más de 8 millones de pesos en beneficios económicos anuales.

Tabla 25. Estimación del impacto energético y económico

Tipo de sitio	Superficie (m²)	Ahorro energético (kWh/año)	Ahorro económico (MXN/año)
Mercado	53,262.00	298,545.76	\$ 829,509.39
Hospital	61,304.00	317,396.15	\$ 881,885.20
Centro comercial	225,504.00	1,264,001.79	\$ 3,512,028.96
Supermercado	88,060	1,002,932.59	\$ 2,786,648.21
Total	514,319.00	2,882,876.29	\$ 8,010,071.77

5.5 Recomendaciones estratégicas

Con base en los hallazgos de la presente investigación en donde se demostró que un TVLE diseñado bajo principios de economía circular, incluso en una superficie reducida (6m²) puede generar beneficios ambientales y energéticos medibles como la disminución de la temperatura ambiental, menor radiación incidente, desarrollo de la vegetación. Respecto a la investigación en la dimensión social demostró que los techos verdes existentes en la CDMX tienen una percepción social mayormente positiva. En su conjunto esto confirma que los TVLE representan una alternativa viable y replicable para ciudades con limitada disponibilidad de AVU, como lo es la CDMX.

A partir de esta evidencia, se formulan recomendaciones que se agrupan en tres ejes: normatividad, diseño y seguimiento, con el propósito de facilitar su implementación, promover el desarrollo de modelos accesibles y adaptados al contexto urbano local, así como para contribuir a la toma de decisiones para consolidar esta infraestructura como herramienta de adaptación climática y gestión ambiental.

5.5.1 Normatividad

- Implementar incentivos económicos, como subsidios directos o deducciones fiscales para proyectos de techos verdes que prioricen sistemas con materiales reciclados y de bajo impacto ambiental, como el TVLE. Con ello se busca reducir la dependencia de materiales
- Incorporar estándares nacionales obligatorios que establezcan requisitos mínimos para techos verdes en nuevas construcciones, tomando como referencia modelos normativos internacionales exitosos.
- Reconocer formalmente a los techos verdes dentro del marco de adaptación al cambio climático de la CDMX, como herramienta de adaptación climática, para integrarlo en planes de resiliencia y ordenamiento urbano.

5.5.2 Diseño

- Desarrollar protocolos técnicos para la elección de especies vegetales cuyas características fisiológicas provean de un óptimo rendimiento térmico, estabilidad anual y resiliencia hídrica, complementándolas con especies adecuadas para periodos de lluvias.
- Estandarizar modelos de TVLE de bajo mantenimiento, empleando materiales de origen local, reusados o reciclados para el sustrato y la capa drenante para reducir costos de instalación y transporte.
- Impulsar proyectos piloto en edificaciones públicas, como escuelas, hospitales, centros comerciales, que permitan demostrar a la sociedad la viabilidad técnica, económica y ambiental del TVLE en zonas de la CDMX (Figura 34). La presencia de estos espacios en áreas de uso público potencialmente fomentaría la apropiación social y la educación ambiental tangible.

5.5.3 Seguimiento

- Diseñar campañas de sensibilización y capacitación dirigidas a propietarios, empresas constructoras y desarrolladores inmobiliarios sobre los beneficios económicos y energéticos del TVLE.
- Implementar programas de capacitación técnica para arquitectos, ingenieros y gestores urbanos en el diseño, mantenimiento y evaluación de desempeño y destición circular de materiales en la estructura de los techos verdes.
- Crear un sistema integral de monitoreo y evaluación basado en indicadores energéticos, económicos y ambientales, con herramientas de teledetección, sensores in situ y bases de datos abiertas. Con esto se generaría evidencia para el fortalecimiento de la política pública, la toma de decisiones, escalar buenas prácticas y la mejora continua

5.6 Alcance y limitaciones de la investigación

- El análisis experimental del TVLE se llevó a cabo en un solo sitio de prueba solo para monitorear la RS.
- El monitoreo de captación de CO₂ fue por medio de imágenes satelitales para el inventario de los techos verdes.
- La estimación del potencial energético y económico se basa en supuestos teóricos y parámetros estándar a partir de la RS.
- El análisis de calidad de vegetación mediante el índices VARI se realizó únicamente en cinco techos verdes seleccionados como referencia, lo cual representa una muestra acotada dentro del inventario total.
- El inventario georreferenciado depende de la disponibilidad de información pública y observación remota, por lo que puede existir infraestructura no contabilizada.

CONCLUSIONES

La presente investigación da respuesta a la pregunta de investigación por medio de la estimación de los impactos en las dimensiones ambientales, sociales y económicas. Por lo que confirma la hipótesis planteada al demostrar que la implementación de TVLE es una alternativa sustentable que contribuye a la adaptación urbana frente a diversos efectos del cambio climático en la CDMX.

Se diseñó e instaló un TVLE como alternativa al TVC para mejorar su HC y su rentabilidad; además de su monitoreo térmico. En primera instancia alineado a los principios de la EC se emplearon MOR y materiales locales en su estructura, en este caso la capa de drenante y sustrato evitan el 27% de las emisiones asociadas a las etapas de extracción y producción. En total el TVLE tiene una HC 94.8% menor a la de un TVC. En términos de la rentabilidad el TVLE es un 25.9% más económico que el TVC, con un período de recuperación de inversión en 18 meses.

Respecto al desempeño térmico, este fue favorable ya que cinco de las especies en el TVLE: *S. dendroideum* (lagrima de María), *S. nussbamerianum* (sedo dorado), *S. pachyphyllum* (dedos de Dios), *S. rubrotinctum* (dedo de niño) y *G. paraguayense* (planta madre perla), disminuyen la temperatura ambiental superficial entre 2.7°C y 2.3°C, en época de lluvias y secas respectivamente lo cual aporta a la regulación del microclima urbano. Estas especies vegetales tolerantes a la sequía, como en este caso mantienen la eficiencia térmica sin irrigación adicional. Esto es relevante para las ciudades donde el acceso al agua potable y la cobertura de AVU han disminuido, a la vez que las temperaturas y la población siguen en aumento.

La elaboración de un inventario georreferenciado de techos verdes de la CDMX permitió estimar el impacto actual ambiental de SbN. En este sentido, los resultados del análisis de calidad de la vegetación indican que estos sistemas captan aproximadamente 0.77 tonCO₂/año, el impacto total en términos de mitigación de GEI es limitado a escala ciudad; su papel se vuelve importante al combinarse con beneficios como regulación térmica, retención de agua pluvial, biodiversidad y valor social. Además, a partir del análisis de los índices MSAVI y VARI, se concluye que

que la funcionalidad de cada techo verde depende de múltiples factores, tales como: el diseño, la tipología, la diversidad de las especies seleccionadas y sus características fisiológicas, así como el manejo del sistema, incluyendo riego y mantenimiento.

Socialmente, el estudio realizado en cuatro techos verdes representativos en la CDMX evidenció que estos generan múltiples beneficios percibidos por los usuarios, incluyendo bienestar emocional, mejora de la estética, conexión con la naturaleza y mejora del confort térmico. A pesar de esto, se identificó una baja conciencia social sobre su existencia y beneficios, lo que puede ser un obstáculo para su adopción.

Los resultados cualitativos demuestran que la frecuencia de uso, la valoración emocional y las experiencias estéticas influyen en la aceptación social, y que la falta de difusión, recursos económicos y políticas públicas limitan su expansión. Como parte de este análisis también se identificaron barreras estructurales e institucionales para su adopción a gran escala estas son la falta de regulación y políticas públicas, los altos costos de mantenimiento e instalación.

El análisis de las políticas internacionales para la adopción de techos verdes permitió determinar el nivel de avance en este contexto, el cual se considera como mínimo. Ante este escenario, los resultados de esta investigación apuntan a la necesidad de implementar una combinación de normativas como se ha realizado en otros países tales como incentivos fiscales que integran subsidios, deducciones y créditos, junto con programas educativos y campañas de concienciación pública, para fortalecer la adopción y el desarrollo de los techos verdes como herramienta sustentable.

A partir del análisis de decisiones multicriterio basado en SIG, se identificaron tres niveles de zonas prioritarias por sus características socioambientales, cuya superficie total podría beneficiarse de incluir 428.05km² de techos verdes en su infraestructura. A pesar de ser una cantidad significativa, cubrir toda esa superficie no es factible debido a las diversas características estructurales de los inmuebles. Por ello se estimó la instalación de TVLE en 514,000 m² en edificios como

hospitales, mercados y centros comerciales que podrían captar potencialmente 0.003% de las emisiones anuales así como aumentar en 0.63% el AVU de la CDMX.

Aunque estos valores pueden considerarse limitados si se contempla el uso de techos verdes como única estrategia para aumentar AVU y adaptar la ciudad al cambio climático, su implementación contribuye a la mejora del microclima, la regulación de la temperatura urbana, la retención de agua de lluvia, el aumento de la biodiversidad urbana y la educación ambiental. Además de servir como un complemento estratégico a otras medidas de infraestructura verde y marcos regulatorios.

Al ser uno de los primeros estudios de este tipo en la CDMX, los resultados permiten sentar las bases para la planificación urbana futura, priorizando zonas y edificaciones donde los techos verdes pueden maximizar su impacto en las tres dimensiones de la sustentabilidad.

En términos de eficiencia térmica, el impacto de los techos verdes contribuirían en la reducción de temperaturas mejorando el microclima y un ahorro energético superior a 2.8 millones de kWh anuales. Lo que se traduce en una potencial inversión rentable, con beneficios económicos mayores de los 8 millones de pesos, considerando el uso de aire acondicionado en cada una de las infraestructuras.

Los hallazgos de esta investigación son una base metodológica cuya aproximación multidimensional de la sustentabilidad articula la evidencia científica inédita para el contexto de la CDMX, al evaluar experimentalmente un TVLE, reducir la HC, integrar teledetección, SIG y análisis multicriterio para evaluar impactos y zonas de oportunidad. Se construyó el primer inventario georreferenciado actualizado de techos verdes en la CDMX, que incluye datos de superficie, tipo y año estimado de instalación.

Así, los techos verdes y en particular el TVLE, es una herramienta de adaptación climática. Su implementación no deben considerarse como una solución única o aislada sino integrada en la normatividad urbana y parte de un marco de planeación urbana que integre múltiples SbN para enfrentar los efectos del cambio climático.

Algunas de las investigaciones futuras que podrían derivarse de esta investigación incluyen la medición de variables en otros techos verdes en la CDMX o en otras ciudades del país, así como en el TVLE, considerando factores como la temperatura del sustrato, la retención y calidad del agua de lluvia, así como la presencia de la biodiversidad.

De manera específica, la investigación futura requiere incorporar equipamiento especializado para realizar mediciones in situ de la captura de CO₂, a nivel de especies vegetales individuales, lo cual permitiría cuantificar con precisión las diferencias fisiológicas y de desempeño entre distintas plantas utilizadas en techos verdes. Asimismo, sería pertinente crear una base nacional de datos de techos verdes de acceso abierto que permita visualizar e integrar la información para generar antecedentes robustos que pueden ser usados para la toma de decisiones.

Finalmente este estudio reafirma que los techos verdes no son únicamente una estrategia técnica o decorativa, sino una herramienta sustentable de adaptación al cambio climático, con potencial de incidir en la transformación estructural de las ciudades. Su implementación evidencia beneficios integrales en tres dimensiones clave: ambiental, al reducir la temperatura superficial y mejorar el microclima urbano, disminuir la HC; económica, al generar ahorros energéticos significativos, con una relación costo-beneficio favorable, incluso sin requerir riego adicional que compita con el uso doméstico del agua; y social, el impacto positivo de los techos verdes en el bienestar emocional y mental de las personas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul Rahman, A., Mohamed Zaid, S., & Mohammad Shuhaimi, N. D. A. (2022). Effects of Green Roof in Reducing Surface Temperature and Addressing Urban Heat Island in Tropical Climate of Malaysia. *Journal of Design and Built Environment*, 22(2), 1–20. <https://doi.org/10.22452/jdbe.vol22no2.1>
- Abelson, P. (2020). A Partial Review of Seven Official Guidelines for Cost-Benefit Analysis. *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 11(2), 272–293. <https://doi.org/10.1017/bca.2020.3>
- Abeysekera, I. (2024). Integrating First Nations peoples' cultural capital for sustainable development. *Sustainable Development*, 32(1), 43–56. <https://doi.org/10.1002/sd.2643>
- Aboelata, A. (2021). Assessment of green roof benefits on buildings' energy-saving by cooling outdoor spaces in different urban densities in arid cities. *Energy*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119514>
- Adade Williams, P., Sikutshwa, L., & Shackleton, S. (2020). Acknowledging Indigenous and Local Knowledge to Facilitate Collaboration in Landscape Approaches—Lessons from a Systematic Review. *Land*, 9(9), 331. <https://doi.org/10.3390/land9090331>
- Aguilar, A. G. (2008). Peri-urbanization, illegal settlements and environmental impact in Mexico City. *Cities*, 25(3), 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2008.02.003>
- Aguilar, A. G., Flores, M. A., & Lara, L. F. (2022). Peri-Urbanization and Land Use Fragmentation in Mexico City. Informality, Environmental Deterioration, and Ineffective Urban Policy. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.790474>
- Ajuntament de Valencia, & Regidoria de Qualitat Mediambiental, E. renovables, C. C. I. C. I. de L. (2010). *PLAN DE ACCIÓN PARA LA ENERGÍA SOSTENIBLE DE LA CIUDAD DE VALENCIA*. Ajuntament de Valencia.
- Albert, C., Brillinger, M., Guerrero, P., Gottwald, S., Henze, J., Schmidt, S., Ott, E., & Schröter, B. (2021). Planning nature-based solutions: Principles, steps, and insights. *Ambio*, 50(8), 1446–1461. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01365-1>
- Alcaldía Mayor de Bogotá, & Secretaría Distrital de Ambiente. (2011). *Guía de techos verdes en Bogotá*. Secretaría Distrital de Ambiente.
- Aleksejeva, J., Voulgaris, G., & Gasparatos, A. (2024). Systematic review of the climatic and non-climatic benefits of green roofs in urban areas. *Urban Climate*, 58, 102133. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102133>
- Alqahtany, A. (2022). Green Roofs as an Approach to Enhance Urban Sustainability: A Study of Public Perception in Riyadh, Saudi Arabia. *Buildings*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/buildings12122202>
- Álvarez-Véliz, R., & Barton, J. R. (2024). The historical geography of an idea: Sustainable development in Latin America, 1972–2022. *Journal of Historical Geography*, 86, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.jhg.2024.07.007>
- Anderson, V., & Gough, W. A. (2022). Enabling Nature-Based Solutions to Build Back Better—An Environmental Regulatory Impact Analysis of Green Infrastructure in Ontario, Canada. *Buildings*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/buildings12010061>
- Anderson, V., Gough, W. A., Zgela, M., Milosevic, D., & Dunjic, J. (2022). Lowering the Temperature to Increase Heat Equity: A Multi-Scale Evaluation of Nature-Based Solutions in Toronto, Ontario, Canada. *Atmosphere*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/atmos13071027>
- Artículo 296 Bis Del Código Fiscal, Artículo 296 Bis del Código Fiscal (2011).
- Aryal, J., Sitaula, C., & Aryal, S. (2022). NDVI Threshold-Based Urban Green Space Mapping from Sentinel-2A at the Local Governmental Area (LGA) Level of Victoria, Australia. *Land*, 11(3), 351. <https://doi.org/10.3390/land11030351>
- Asghar, M., Ben Cheikh, N., Hunjra, A. I., & Khan, A. (2024). Assessing the impact of natural capital and innovation on sustainable development in developing countries. *Journal of Cleaner Production*, 460, 142576. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142576>
- Ayuntamiento de Madrid. (2023). *PLAN REHABILITA MADRID 2023 GUÍA RÁPIDA PARA EL CIUDADANO*. <https://transforma.madrid.es/wp-content/uploads/2023/10/Guia-Rapida-Plan-Rehabilita-Madrid-2023.pdf>

- Babacan, A., Polat, M., & Kızılkaya, O. (2023). Green Economy in Sustainable Development: An Analysis for OECD Countries. *Istanbul Journal of Economics / İstanbul İktisat Dergisi*, 73(1), 231–260. <https://doi.org/10.26650/ISTJECON2022-1191901>
- Babí Almenar, J., Elliot, T., Rugani, B., Philippe, B., Navarrete Gutierrez, T., Sonnemann, G., & Geneletti, D. (2021). Nexus between nature-based solutions, ecosystem services and urban challenges. *Land Use Policy*, 100, 104898. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104898>
- Bagheri Novair, S., Mirseyed Hosseini, H., Etesami, H., Pirmoradian, N., Asgari Lajayer, B., & Price, G. W. (2024). Straw application improved soil biological properties and the growth of rice plant under low water irrigation. *Environmental Research*, 255, 119138. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119138>
- Bai, H., Li, Z., Guo, H., Chen, H., & Luo, P. (2022). Urban Green Space Planning Based on Remote Sensing and Geographic Information Systems. *Remote Sensing*, 14(17), 4213. <https://doi.org/10.3390/rs14174213>
- Banderas, A. G., & González-Villega, R. (2019). EVALUATION OF THE SUSTAINABILITY OF THE VALLE DE BRAVO RESERVOIR, MEXICO, AS A WATER-SUPPLY SOURCE. 79–93. <https://doi.org/10.2495/WS190081>
- Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35(2–3), 161–173. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U)
- Barrera Alarcón, I. G., Caudillo Cos, C. A., Medina Fernández, S. L., Ávila Jiménez, F. G., & Montejano Escamilla, J. A. (2023). La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura urbana de la Ciudad de México. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 5(3).
- Barrett, S., & Stavins, R. (2003). Increasing Participation and Compliance in International Climate Change Agreements. *International Environmental Agreements*, 3(4), 349–376. <https://doi.org/10.1023/B:INEA.0000005767.67689.28>
- Barriuso, F., & Urbano, B. (2021). Green roofs and walls design intended to mitigate climate change in urban areas across all continents. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su13042245>
- Baryła, A., Gnatowski, T., Karczmarczyk, A., & Szatyłowicz, J. (2019). Changes in Temperature and Moisture Content of an Extensive-Type Green Roof. *Sustainability*, 11(9), 2498. <https://doi.org/10.3390/su11092498>
- Baryła, A., Karczmarczyk, A., & Bus, A. (2018). Role of substrates used for green roofs in limiting rainwater runoff. *Journal of Ecological Engineering*, 19(5), 86–92. <https://doi.org/10.12911/22998993/91268>
- Beg, N., Morlot, J. C., Davidson, O., Afrane-Okesse, Y., Tyani, L., Denton, F., Sokona, Y., Thomas, J. P., La Rovere, E. L., Parikh, J. K., Parikh, K., & Rahman, A. A. (2002). Linkages between climate change and sustainable development. *Climate Policy*, 2(2–3), 129–144. <https://doi.org/10.3763/cpol.2002.0216>
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A. H., & GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411–428. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- Berman, M. G., & Krpan, K. M. (2011). Restorative Natural Environments. A. C. Michalos (Ed.), *Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research* (1987, pp. 5550–5555). Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-007-0753-5_3963
- Bhattacharya, T. R., Bhattacharya, A., Mclellan, B., & Tezuka, T. (2020). Sustainable smart city development framework for developing countries. *Urban Research & Practice*, 13(2), 180–212. <https://doi.org/10.1080/17535069.2018.1537003>
- Bockarjova, M., Botzen, W. J. W., van Schie, M. H., & Koetse, M. J. (2020). Property price effects of green interventions in cities: A meta-analysis and implications for gentrification. *Environmental Science & Policy*, 112, 293–304. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.06.024>
- Bollman, M. A., DeSantis, G. E., Waschmann, R. S., & Mayer, P. M. (2021). Effects of shading and composition on green roof media temperature and moisture. *Journal of Environmental Management*, 281(September 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111882>
- Bonasia, R., Borselli, L., & Madonia, P. (2023). Analysis of Flow and Land Use on the Hydraulic Structure of Southeast Mexico City: Implications on Flood and Runoff. *Land*, 12(6), 1120. <https://doi.org/10.3390/land12061120>

- Boulanger, P.-M., & Bréchet, T. (2005). Models for policy-making in sustainable development: The state of the art and perspectives for research. *Ecological Economics*, 55(3), 337–350. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.07.033>
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Braaker, S., Ghazoul, J., Obrist, M. K., & Moretti, M. (2014). Habitat connectivity shapes urban arthropod communities: the key role of green roofs. *Ecology*, 95(4), 1010–1021. <https://doi.org/10.1890/13-0705.1>
- Bratman, G. N., Hamilton, J. P., & Daily, G. C. (2012). The impacts of nature experience on human cognitive function and mental health. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1249(1), 118–136. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06400.x>
- Brodhag, C., & Taliere, S. (2006). Sustainable development strategies: Tools for policy coherence. *Natural Resources Forum*, 30(2), 136–145. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2006.00166.x>
- Brokking, P., Mörtberg, U., & Balfors, B. (2021). Municipal Practices for Integrated Planning of Nature-Based Solutions in Urban Development in the Stockholm Region. *Sustainability*, 13(18), 10389. <https://doi.org/10.3390/su131810389>
- Brudermann, T., & Sangkakool, T. (2017). Green roofs in temperate climate cities in Europe – An analysis of key decision factors. *Urban Forestry and Urban Greening*, 21, 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.12.008>
- Buckland, C. E., Thomas, D. S. G., Jägermeyr, J., Müller, C., & Smith, J. A. C. (2023). Drought-tolerant succulent plants as an alternative crop under future global warming scenarios in sub-Saharan Africa. *GCB Bioenergy*, 15(10), 1287–1308. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13095>
- Burton, I., Challenger, B., Huq, S., Klein, R. J. T., & Yohe, G. (2001). Adaptation to Climate Change in the Context of Sustainable Development and Equity. A. Patwardhan & J.-F. Soussana (Eds.), *TAR Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (1st ed., pp. 881–906). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/wg2TARchap18.pdf>
- Bush, J., & Doyon, A. (2019). Building urban resilience with nature-based solutions: How can urban planning contribute? *Cities*, 95, 102483. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102483>
- Calheiros, C. S. C., & Stefanakis, A. I. (2021). Green Roofs Towards Circular and Resilient Cities. *Circular Economy and Sustainability*, 1(1), 395–411. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00033-0>
- Calviño, A. A., Tavella, J., Beccacece, H. M., Estallo, E. L., Fabián, D., Moreno, M. L., Salvo, A., & Fenoglio, M. S. (2023). The native - exotic plant choice in green roof design: Using a multicriteria decision framework to select plant tolerant species that foster beneficial arthropods. *Ecological Engineering*, 187, 106871. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106871>
- Canteiro, M., Arellano-Aguilar, O., Bravo, J. E. B., & Zambrano, L. (2023). Urban green spaces and their relationship with groundwater quality: the case of a shallow aquifer in the south of Mexico City. *Sustainable Water Resources Management*, 9(5), 156. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00935-x>
- Canteiro, M., Prado, B., Fernández, T., & Zambrano, L. (2025a). The relation between urban green spaces, shallow aquifers and water availability for cities: A case study in Mexico City. *PLOS Water*, 4(4), e0000324. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000324>
- Cárdenas-Soto, M., Piña-Flores, J., Escobedo-Zenil, D., Vidal-García, M. C., Natarajan, T., Hussain, Y., & Sánchez-Sesma, F. J. (2021). Seismic ambient noise tomography to retrieve near-surface properties in soils with significant 3D lateral heterogeneity: the case of Quinta Colorada building in Chapultepec, Mexico. *Natural Hazards*, 108(1), 129–145. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04735-4>
- Carolus, J. F., Hanley, N., Olsen, S. B., & Pedersen, S. M. (2018). A Bottom-up Approach to Environmental Cost-Benefit Analysis. *Ecological Economics*, 152, 282–295. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.06.009>

- Carter, T., & Fowler, L. (2008). Establishing green roof infrastructure through environmental policy instruments. *Environmental Management*, 42(1), 151–164. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9095-5>
- Carter, T., & Keeler, A. (2008). Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of Environmental Management*, 87(3), 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.024>
- Cascone, S., Coma, J., Gagliano, A., & Pérez, G. (2019). The evapotranspiration process in green roofs: A review. *Building and Environment*, 147(July 2018), 337–355. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.024>
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., & Davison, J. B. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42(10), 1582–1591. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.004>
- Cervantes-Nájera, A. L., Martínez-Rodríguez, M. C., Campos-Villegas, L. E., Bello-Yañez, X. V., & Brenneisen, S. (2024). Green Roof Systems within the Framework of a Circular Economy: A Scoping Review. *Recycling* 9(4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/recycling9040069>
- Chang, D. L., Sabatini-Marques, J., da Costa, E. M., Selig, P. M., & Yigitcanlar, T. (2018). Knowledge-based, smart and sustainable cities: a provocation for a conceptual framework. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 4(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s40852-018-0087-2>
- Chapman, S., Thatcher, M., Salazar, A., Watson, J. E. M., & McAlpine, C. A. (2019). The impact of climate change and urban growth on urban climate and heat stress in a subtropical city. *International Journal of Climatology*, 39(6), 3013–3030. <https://doi.org/10.1002/joc.5998>
- Chaussard, E., Havazli, E., Fattahi, H., Cabral-Cano, E., & Solano-Rojas, D. (2021). Over a Century of Sinking in Mexico City: No Hope for Significant Elevation and Storage Capacity Recovery. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(4). <https://doi.org/10.1029/2020JB020648>
- Chow, M. F., & Bakar, M. F. A. (2019). *Environmental Benefits of Green Roof to the Sustainable Urban Development: A Review* (pp. 1525–1541). https://doi.org/10.1007/978-981-10-8016-6_110
- Cidade Do Recife. (2014). Institui A Política Municipal De Educação Ambiental E Dá Outras Providências. *LEI No 18.083/2014 (No 18.083/2014)*.
- Cigna, F., & Tapete, D. (2021). Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014–2020 Sentinel-1 IW InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 253, 112161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112161>
- City of Chicago. (2017). *Chicago Sustainable Development Policy Handbook*. https://www.cityofchicago.org/city/en/depts/dcd/supp_info/sustainable_development/chicago-sustainable-development-policy-handbook0.html
- City of Toronto. (2021). TORONTO MUNICIPAL CODE CHAPTER 492, GREEN ROOFS. *TORONTO MUNICIPAL CODE CHAPTER 492, GREEN ROOFS*. https://www.toronto.ca/legdocs/municode/1184_492.pdf
- City of Vancouver. (2023a). Green Buildings Policy for Rezonings. *Policy*.
- City of Vancouver. (2023b). Green Buildings Policy for Rezonings . *Green Buildings Policy for Rezonings* . City of Vancouver.
- Cohen-Cline, H., Turkheimer, E., & Duncan, G. E. (2015). Access to green space, physical activity and mental health: A twin study. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 69(6), 523–529. <https://doi.org/10.1136/jech-2014-204667>
- Colding, J., Gren, Å., & Barthel, S. (2020). The Incremental Demise of Urban Green Spaces. *Land*, 9(5), 162. <https://doi.org/10.3390/land9050162>
- Collazo-Ortega, M., Rosas, U., & Reyes-Santiago, J. (2017). Towards Providing Solutions to the Air Quality Crisis in the Mexico City Metropolitan Area: Carbon Sequestration by Succulent Species in Green Roofs. *PLoS Currents*, 1–19. <https://doi.org/10.1371/currents.dis.bb66ae4f4f3c6eb118a019a29a9ce80f>
- Comisión Ambiental Metropolitana. (2011). Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020. 2012, 388. <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php>

- CONANP. (2020). *Las tres “erres” mágicas*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. <https://www.gob.mx/conanp/articulos/las-tres-erres-magicas?idiom=es>
- Congreso de la Ciudad de México. (2023). *LEY ORGÁNICA D E ALCALDÍAS D E LA CIUDAD DE MÉXICO*. <https://www.congresocdmx.gob.mx/media/documentos/963389b66b2b9837ce7703f650c7306fca622b5a.pdf>
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2024). *Explorador Poblacional de México*. Indicadores Demográficos de La Ciudad de México. <https://conapo.segob.gob.mx/work/models/CONAPO/pry23/PP/index.html>
- Cook-Patton, S. C., & Bauerle, T. L. (2012). Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs: A literature review. *Journal of Environmental Management*, 106, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.003>
- Cristiano, E., Deidda, R., & Viola, F. (2023). Awareness and willingness to pay for green roofs in Mediterranean areas. *Journal of Environmental Management*, 344, 118419. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118419>
- Cuevas Acuña, G. A., Ayala Moreno, J. P., Esquer Peralta, J., Munguia Vega, N. E., & Alvarado Ibarra, J. (2024). Desempeño térmico de prototipo de techo verde bajo condiciones de calor extremo. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 12(26), 1–19. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2024.26.89127>
- Cui, M., Ferreira, F., Fung, T. K., & Matos, J. S. (2021). Tale of two cities: How nature-based solutions help create adaptive and resilient urban water management practices in singapore and lisbon. *Sustainability (Switzerland)*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/su131810427>
- de la Luz Hernández-Flores, M., Otazo-Sánchez, E. M., Galeana-Pizaña, M., Roldán-Cruz, E. I., Razo-Zárate, R., González-Ramírez, C. A., Galindo-Castillo, E., & Gordillo-Martínez, A. J. (2017). Urban driving forces and megacity expansion threats. Study case in the Mexico City periphery. *Habitat International*, 64, 109–122. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.04.004>
- Dempsey, N., Bramley, G., Power, S., & Brown, C. (2011). The social dimension of sustainable development: Defining urban social sustainability. *Sustainable Development*, 19(5), 289–300. <https://doi.org/10.1002/sd.417>
- Department of General Services Washington. (2006). Green Building Act . *Green Construction*.
- Díaz Muñoz, K., Casanova Guajardo, M., León Torres, C. A., Gil Ramírez, L. A., Bardales Vásquez, C. B., & Cabos Sánchez, J. (2019). Producción de *Pleurotus ostreatus* (Pleurotaceae) ICFC 153/99 cultivado sobre diferentes residuos lignocelulósicos. *Arnaldoa*, 26(3).
- Dong, J., Zuo, J., & Luo, J. (2020). Development of a management framework for applying green roof policy in urban China: A preliminary study. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su122410364>
- Dorst, H., van der Jagt, A., Raven, R., & Runhaar, H. (2019). Urban greening through nature-based solutions – Key characteristics of an emerging concept. *Sustainable Cities and Society*, 49. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101620>
- Dravigne, A., Waliczek, T. M., Lineberger, R. D., & Zajicek, J. M. (2008). The effect of live plants and window views of green spaces on employee perceptions of job satisfaction. *HortScience*, 43(1), 183–187. <https://doi.org/10.21273/hortsci.43.1.183>
- Drozdowski, G., & Dziekański, P. (2022). Net Present Value (NPV) as a Reinforcement of the Decision-Making Process Terms of Investment Selection. *Market Infrastructure*, 66. <https://doi.org/10.32843/infrastruct66-7>
- Du, P., Arndt, S. K., & Farrell, C. (2019). Is plant survival on green roofs related to their drought response, water use or climate of origin? *Science of The Total Environment*, 667, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.349>
- El Concejo de Bogotá, D. C. (2009). Acuerdo 418. *Registro Distrital 4345*. Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
- EOS Data Analytics, Inc. (2025a, May). *Guía de usuario de EOSDA Crop Monitoring*. Guía de Usuario de EOSDA Crop Monitoring.
- EOS Data Analytics, Inc. (2025b, May). *Productos*. Potenciando La Agricultura Con Monitorización De Cultivos Por Satélite.
- EPA. (2025). *Green Vehicle Guide*. Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1017FP5.pdf>

- Everett, G., & Lamond, J. (2019). Green roof perceptions: Newcastle, UK CBD owners/occupiers. *Journal of Corporate Real Estate*, 21(2), 130–147. <https://doi.org/10.1108/JCRE-11-2017-0044>
- Fabbri, K., Tronchin, L., & Barbieri, F. (2021). Coconut fibre insulators: The hygrothermal behaviour in the case of green roofs. *Construction and Building Materials*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121026>
- Faivre, N., Fritz, M., Freitas, T., de Boissezon, B., & Vandewoestijne, S. (2017). Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. *Environmental Research*, 159, 509–518. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.032>
- Faour, G., Mhaweji, M., & Nasrallah, A. (2018). Global trends analysis of the main vegetation types throughout the past four decades. *Applied Geography*, 97, 184–195. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.05.020>
- Fardani, I., Darmawan, S., Hakim, D. M., Harto, A. B., & Wikantika, K. (2016). INCREASING ACCURACY VALUE IN THE ESTIMATES OF CARBON STOCK BY USING VEGETATION INDEX FROM ALOS AVNIR 2 SATELLITE IMAGERY. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*, 3(1). <https://doi.org/10.14710/geoplanning.3.1.1-14>
- Feng, C., Meng, Q., & Zhang, Y. (2010). Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*, 42(6), 959–965. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.014>
- Fernandez-Canero, R., & Gonzalez-Redondo, P. (2010). Green roofs as a habitat for birds: A review. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 9(15), pp. 2041–2052. <https://doi.org/10.3923/javaa.2010.2041.2052>
- Ferreira, V., Paula, A., Loures, L., Antunes, D., & Panagopoulos, T. (2021). Stakeholders' perceptions of appropriate nature-based solutions in the urban context. *Journal of Environmental Management*, 298(March), 113502. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113502>
- Finanças e Ambiente e Ação Climática, Gabinete do Ministro do Ambiente e da Ação Climática, & Gabinete da Secretária de Estado do Orçamento. (2024). Portaria n.o 408/2024/2. *Portaria n.o 408/2024/2 (N. o 408/2024/2)*.
- Fleck, R., Gill, R. L., Saadeh, S., Pettit, T., Wooster, E., Torpy, F., & Irga, P. (2022). Urban green roofs to manage rooftop microclimates: A case study from Sydney, Australia. *Building and Environment*, 209, 108673. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108673>
- Franchini, M., & Mannucci, P. M. (2015). Impact on human health of climate changes. *European Journal of Internal Medicine*, 26(1), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.ejim.2014.12.008>
- Francis, L. F. M., & Jensen, M. B. (2017). Benefits of green roofs: A systematic review of the evidence for three ecosystem services. *Urban Forestry and Urban Greening*, 28(April), 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.10.015>
- Frantzeskaki, N. (2019). Seven lessons for planning nature-based solutions in cities. *Environmental Science and Policy*, 93(January), 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.033>
- Fritz, M. M. C., & Silva, M. E. (2018). Exploring supply chain sustainability research in Latin America. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 48(8), 818–841. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2017-0023>
- Futcher, J., Mills, G., Emmanuel, R., & Korolija, I. (2017). Creating sustainable cities one building at a time: Towards an integrated urban design framework. *Cities*, 66, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.03.009>
- Gan, L., Garg, A., Huang, S., Wang, H., Wang, J., Mei, G. X., Liu, J. Q., & Zhang, K. X. (2023). Investigation of spatial variability of soil hydraulic properties for application in intensive green roofs. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(6), 6849–6858. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04376-5>
- García Sánchez, M., Padilla-Rivera, A., & Güereca, L. P. (2023). Social Life Cycle Assessment of Mexico City's Water Cycle. *Advanced Sustainable Systems*, 7(6). <https://doi.org/10.1002/adsu.202300024>
- Garza, G. (2005). *La urbanización de México en el siglo XX*. El Colegio de México, Centro de Estudios Demográficos y de Desarrollo Urbano. [169](https://biblioteca-</p>
</div>
<div data-bbox=)

- repositorio.clacso.edu.ar/bitstream/CLACSO/250835/1/La-urbanizacion-mexico.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Gautam, Y. K., Sharma, K., Tyagi, S., Ambedkar, A. K., Chaudhary, M., & Pal Singh, B. (2021). Nanostructured metal oxide semiconductor-based sensors for greenhouse gas detection: progress and challenges. *Royal Society Open Science*, 8(3), rsos.201324. <https://doi.org/10.1098/rsos.201324>
- Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2009). Substrate depth influences sedum plant community on a green roof. *HortScience*, 44(2), 401–407. <https://doi.org/10.21273/hortsci.44.2.401>
- Getter, K. L., Rowe, D. B., Robertson, G. P., Cregg, B. M., & Andresen, J. A. (2009). Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental Science and Technology*, 43(19), 7564–7570. <https://doi.org/10.1021/es901539x>
- Ghorbanzadeh, O., Feizizadeh, B., & Blaschke, T. (2018). Multi-criteria risk evaluation by integrating an analytical network process approach into GIS-based sensitivity and uncertainty analyses. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 127–151. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1413012>
- Gobierno CDMX. (2004). *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. Gaceta Oficial del Distrito Federal. https://infocdmx.org.mx/escuela/curso_capacitadores/procesos_contratacion/reglamento_construcciones.pdf
- Gobierno de la Ciudad de México. (2014). Uso de suelo. *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México. Actualización de los Mapas de Riesgo. La Magdalena Contreras*. http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/storage/app/media/docpub/atlasriesgo/MR_La_Magdalena_Contreras.pdf
- Gobierno de la Ciudad de México. (2022). *Programa Especial de Infraestructura Verde de la CDMX*.
- Govind, P. J., & Alam, S. (2023). Nature-based solutions (NbS) and climate change adaptation in Bangladesh: does planning law facilitate NbS for climate change adaptation in Dhaka? *Climate and Development*, 15(7), 628–638. <https://doi.org/10.1080/17565529.2022.2140006>
- Green Roofs for Healthy Cities—North America Inc. (2015). *How Your Community Will Benefit From Adopting Green Roof Policy*.
- Green Roofs for Healthy Cities. (2023a). *Green roof and wall policy in North America: Regulations, Incentives and Approaches 2023*. https://greenroofs.org/s/Green_Roof_and_Wall_Policy_in_North_America-63pf.pdf
- Green Roofs for Healthy Cities. (2023b). *Policy Resources. 2023 Policy Guide*.
- Greene, R., Devillers, R., Luther, J. E., & Eddy, B. G. (2011). GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. *Geography Compass*, 5(6), 412–432. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2011.00431.x>
- Guattari, C., Evangelisti, L., Asdrubali, F., & De Lieto Vollaro, R. L. (2020). Experimental evaluation and numerical simulation of the thermal performance of a green roof. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/app10051767>
- Gupta, J. (2010). A history of international climate change policy. *WIREs Climate Change*, 1(5), 636–653. <https://doi.org/10.1002/wcc.67>
- Gurrea-Ysasi, G., Blanca-Giménez, V., Fernández de Córdoba, P., Cortés-Olmos, C., Rodríguez-Burruezo, A., & Fita, I. C. (2022). Comparative Study of Different Crassulaceae Species for Their Potential Use as Plant Covers to Improve Thermal Performance of Green Roofs. *Horticulturae*, 8(9), 846. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8090846>
- Gutiérrez, R., Díaz, K., & Román, P. (2016). El concepto de familia en México: Una revisión desde la mirada antropológica y demográfica. *Ciencia Ergo Sum*, 23(3), 219–228.
- Ha Tran, M. K. T., Cabahug-Braza, R. A. M., & Hwang, Y.-J. (2024). Echeveria Leaf Morpho-Anatomical Analysis and Its Implications for Environmental Stress Conditions. *Horticulturae*, 10(4), 308. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040308>
- Haksever, T. S., & Markoc, I. (2020). Social Perception of the Green Roofs in Contribution to Urban Sustainability: Istanbul. *Developing Country Studies*. <https://doi.org/10.7176/DCS/10-4-08>
- Halim, M. A., Vantellingen, J., Gorgolewski, A. S., Rose, W. K., Drake, J. A. P., Margolis, L., & Thomas, S. C. (2022). Greenhouse gases and green roofs: carbon dioxide and methane

- fluxes in relation to substrate characteristics. *Urban Ecosystems*, 25(2), 487–498. <https://doi.org/10.1007/s11252-021-01166-8>
- Harada, Y., & Whitlow, T. H. (2020). Urban Rooftop Agriculture: Challenges to Science and Practice. *Frontiers Sustainable Food Systems*, 4(June), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00076>
- Hochman, G., & Appasamy, V. (2024). The Case for Carbon Capture and Storage Technologies. *Environments*, 11(3), 52. <https://doi.org/10.3390/environments11030052>
- Horlings, L. (2015). The inner dimension of sustainability: personal and cultural values. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.06.006>
- Hossain, M. A., Shams, S., Amin, M., Reza, M. S., & Chowdhury, T. U. (2019). Perception and barriers to implementation of intensive and extensive green roofs in Dhaka, Bangladesh. *Buildings*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/buildings9040079>
- Hristov, I., Appolloni, A., Chirico, A., & Cheng, W. (2021). The role of the environmental dimension in the performance management system: A systematic review and conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126075. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126075>
- Hu, J., Zhang, F., Qiu, B., Zhang, X., Yu, Z., Mao, Y., Wang, C., & Zhang, J. (2024). Green-gray imbalance: Rapid urbanization reduces the probability of green space exposure in early 21st century China. *Science of The Total Environment*, 933, 173168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173168>
- Huang, J., Kong, F., Yin, H., Middel, A., Liu, H., & Meadows, M. E. (2023). Green roof effects on urban building surface processes and energy budgets. *Energy Conversion and Management*, 287, 117100. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117100>
- Hunter, M. C. R., Gillespie, B. W., & Chen, S. Y. P. (2019). Urban nature experiences reduce stress in the context of daily life based on salivary biomarkers. *Frontiers in Psychology*, 10(APR), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00722>
- IMARC Group. (2023). *Green Roof Market Report by Type (Extensive, Intensive), Distribution Channel (Online, Offline), Application (Residential, Commercial, Industrial), and Region 2024-2032*.
- Imperquimia. (2021). *Ficha Técnica. UNIPLAS JARDIN FLEXO NANO SBS 4.0 PG ROJO* (pp. 1–3). [https://imperquimia.mx/admin/ajax/archivos/Productos/UNIPLAS JARDÍN FLEXO NANO SBS 4.0 PG ROJO/FT-UNIPLAS-JARDIN-FLEXO-NANO-SBS-4.0-PG-ROJO.pdf](https://imperquimia.mx/admin/ajax/archivos/Productos/UNIPLAS_JARDÍN_FLEXO_NANO_SBS_4.0_PG_ROJO/FT-UNIPLAS-JARDIN-FLEXO-NANO-SBS-4.0-PG-ROJO.pdf)
- INEGI. (2025, June). *Economía y Sectores Productivos. Parque vehicular*. Venta al Público de Automóviles. [https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/#:~:text=46%2C410N%C3%BAmero%20de%20nidades&text=Los%20datos%20se%20refieren%20a,de%20Veh%C3%ADculos%20Ligeros%20\(%20RAIAVL\)](https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/#:~:text=46%2C410N%C3%BAmero%20de%20nidades&text=Los%20datos%20se%20refieren%20a,de%20Veh%C3%ADculos%20Ligeros%20(%20RAIAVL))
- Instituto de Planeación Democrática y Prospectiva (IPDP). (2022). *Zonas por nivel de ingresos medios, altos y muy altos de los hogares*.
- Instituto Mexicano del Transporte, & Secretaría de Infraestructura, C. y T. (SICT). (2024). Inteligencia geoespacial. In Red Nacional de Caminos. Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). Censo De Población Y Vivienda 2020. *Comunicado de prensa Núm.98/21* (pp. 1–3). https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/EstSociodemo/ResultCenso2020_CdMx.pdf
- J. C. DeNardo, A. R. Jarrett, H. B. Manbeck, D. J. Beattie, & R. D. Berghage. (2005). STORMWATER MITIGATION AND SURFACE TEMPERATURE REDUCTION BY GREEN ROOFS. *Transactions of the ASAE*, 48(4), 1491–1496. <https://doi.org/10.13031/2013.19181>
- Jabareen, Y. (2008). A New Conceptual Framework for Sustainable Development. *Environment, Development and Sustainability*, 10(2), 179–192. <https://doi.org/10.1007/s10668-006-9058-z>
- Janssens-Maenhout, G., Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Dentener, F., Bergamaschi, P., Pagliari, V., Olivier, J. G. J., Peters, J. A. H. W., van Aardenne, J. A., Monni, S., Doering, U., Petrescu, A. M. R., Solazzo, E., & Oreggioni, G. D. (2019). EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major greenhouse gas emissions for the period 1970–2012. *Earth System Science Data*, 11(3), 959–1002. <https://doi.org/10.5194/essd-11-959-2019>

- Jim, C. Y. (2017a). An archaeological and historical exploration of the origins of green roofs. *Urban Forestry and Urban Greening*, 27(January), 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.014>
- Jim, C. Y. (2017b). Green roof evolution through exemplars: Germinal prototypes to modern variants. *Sustainable Cities and Society*, 35(July), 69–82. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.001>
- Joshi, M. Y., & Teller, J. (2021). Urban integration of green roofs: Current challenges and perspectives. *Sustainability (Switzerland)* 13, (22). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su132212378>
- Juras, P. (2022). Positive Aspects of Green Roof Reducing Energy Consumption in Winter. *Energies*, 15(4), 1493. <https://doi.org/10.3390/en15041493>
- Juras, P. (2023). Rainwater Retention Test of Various Green Roofs: Influence on Membrane Temperatures and Evapotranspiration. *Buildings*, 13(8), 2058. <https://doi.org/10.3390/buildings13082058>
- Kabisch, N., Frantzeskaki, N., Pauleit, S., Naumann, S., Davis, M., Artmann, M., Haase, D., Knapp, S., Korn, H., Stadler, J., Zaunberger, K., & Bonn, A. (2016). Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: Perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. *Ecology and Society*, 21(2). <https://doi.org/10.5751/ES-08373-210239>
- Kaivo-oja, J., Panula-Ontto, J., Vehmas, J., & Luukkanen, J. (2014). Relationships of the dimensions of sustainability as measured by the sustainable society index framework. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 21(1), 39–45. <https://doi.org/10.1080/13504509.2013.860056>
- Kalantari, Z., Ferreira, C. S. S., Pan, H., & Pereira, P. (2023). Nature-based solutions to global environmental challenges. *Science of The Total Environment*, 880, 163227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163227>
- Kamal, A., Al-Ghamdi, S. G., & Koc, M. (2019). Revaluing the costs and benefits of energy efficiency: A systematic review. *Energy Research & Social Science*, 54, 68–84. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.03.012>
- Kamel, S. M., Elgobashy, S. F., Omara, R. I., Derbalah, A. S., Abdelfatah, M., El-Shaer, A., Al-Askar, A. A., Abdelkhalek, A., Abd-Elsalam, K. A., Essa, T., Kamran, M., & Elsharkawy, M. M. (2022). Antifungal Activity of Copper Oxide Nanoparticles against Root Rot Disease in Cucumber. *Journal of Fungi*, 8(9), 911. <https://doi.org/10.3390/jof8090911>
- Karteris, M., Theodoridou, I., Mallinis, G., Tsiros, E., & Karteris, A. (2016). Towards a green sustainable strategy for Mediterranean cities: Assessing the benefits of large-scale green roofs implementation in Thessaloniki, Northern Greece, using environmental modelling, GIS and very high spatial resolution remote sensing data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 510–525. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.098>
- Keesstra, S., Nunes, J., Novara, A., Finger, D., Avelar, D., Kalantari, Z., & Cerdà, A. (2018). The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 610–611, 997–1009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.077>
- Khairul Anuar, N. F. S., Huyop, F., Ur-Rehman, G., Abdullah, F., Normi, Y. M., Sabullah, M. K., & Abdul Wahab, R. (2022). An Overview into Polyethylene Terephthalate (PET) Hydrolases and Efforts in Tailoring Enzymes for Improved Plastic Degradation. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(20), 12644. <https://doi.org/10.3390/ijms232012644>
- Khan, M., Al Azzawi, T. N. I., Ali, S., Yun, B.-W., & Mun, B.-G. (2023). Nitric Oxide, a Key Modulator in the Alleviation of Environmental Stress-Mediated Damage in Crop Plants: A Meta-Analysis. *Plants*, 12(11), 2121. <https://doi.org/10.3390/plants12112121>
- Khorrami, M., Shirzaei, M., Ghobadi-Far, K., Werth, S., Carlson, G., & Zhai, G. (2023). Groundwater Volume Loss in Mexico City Constrained by InSAR and GRACE Observations and Mechanical Models. *Geophysical Research Letters*, 50(5). <https://doi.org/10.1029/2022GL101962>
- Khraishah, H., Alahmad, B., Ostergard, R. L., AlAshqar, A., Albaghdadi, M., Vellanki, N., Chowdhury, M. M., Al-Kindi, S. G., Zanobetti, A., Gasparri, A., & Rajagopalan, S. (2022). Climate change

- and cardiovascular disease: implications for global health. *Nature Reviews Cardiology*, 19(12), 798–812. <https://doi.org/10.1038/s41569-022-00720-x>
- Knapp, S., Schmauck, S., & Zehndorf, A. (2019). Biodiversity Impact of Green Roofs and Constructed Wetlands as Progressive Eco-Technologies in Urban Areas. *Sustainability*, 11(20), 5846. <https://doi.org/10.3390/su11205846>
- Knaus, M., & Haase, D. (2020). Green roof effects on daytime heat in a prefabricated residential neighbourhood in Berlin, Germany. *Urban Forestry and Urban Greening*, 53(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126738>
- Kolbert, Z., Barroso, J. B., Brouquisse, R., Corpas, F. J., Gupta, K. J., Lindermayr, C., Loake, G. J., Palma, J. M., Petřivalský, M., Wendehenne, D., & Hancock, J. T. (2019). A forty year journey: The generation and roles of NO in plants. *Nitric Oxide*, 93, 53–70. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2019.09.006>
- Konopka, J., Heusinger, J., & Weber, S. (2021). Extensive Urban Green Roof Shows Consistent Annual Net Uptake of Carbon as Documented by 5 Years of Eddy-Covariance Flux Measurements. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(2). <https://doi.org/10.1029/2020JG005879>
- Kooijman, E. D., McQuaid, S., Rhodes, M.-L., Collier, M. J., & Pilla, F. (2021). Innovating with Nature: From Nature-Based Solutions to Nature-Based Enterprises. *Sustainability*, 13(3), 1263. <https://doi.org/10.3390/su13031263>
- Krings, E. J., Zhang, H., Sarin, S., Shield, J. E., Ryu, S., & Markvicka, E. J. (2021). Lightweight, Thermally Conductive Liquid Metal Elastomer Composite with Independently Controllable Thermal Conductivity and Density. *Small*, 17(52). <https://doi.org/10.1002/sml.202104762>
- Kronenberg, J. (2016). Nature-based solutions. *EkoMiasto Środowisko. Zrównoważony, inteligentny i partycypacyjny rozwój miasta*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego. <https://doi.org/10.18778/7969-576-8.11>
- Ksiazek-Mikenas, K., Chaudhary, V. B., & Skogen, K. A. (2023). Combinations of plant species with complementary traits have the potential to maximize ecosystem services on green roofs. *Urban Ecosystems*, 26(5), 1193–1208. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01383-3>
- Kumakoshi, Y., Chan, S. Y., Koizumi, H., Li, X., & Yoshimura, Y. (2020). Standardized Green View Index and Quantification of Different Metrics of Urban Green Vegetation. *Sustainability*, 12(18), 7434. <https://doi.org/10.3390/su12187434>
- Kumar, P., Debele, S. E., Sahani, J., Aragão, L., Barisani, F., Basu, B., Bucchignani, E., Charizopoulos, N., Di Sabatino, S., Domeneghetti, A., Edo, A. S., Finér, L., Gallotti, G., Juch, S., Leo, L. S., Loupis, M., Mickovski, S. B., Panga, D., Pavlova, I., ... Zieher, T. (2020). Towards an operationalisation of nature-based solutions for natural hazards. *Science of The Total Environment*, 731, 138855. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138855>
- Kuronuma, T., Watanabe, H., Ishihara, T., Kou, D., Toughima, K., Ando, M., & Shindo, S. (2018). CO2 Payoff of extensive green roofs with different vegetation species. *Sustainability*, 10(7), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su10072256>
- Kutty, A. A., Abdella, G. M., Kucukvar, M., Onat, N. C., & Bulu, M. (2020). A system thinking approach for harmonizing smart and sustainable city initiatives with United Nations sustainable development goals. *Sustainable Development*, 28(5), 1347–1365. <https://doi.org/10.1002/sd.2088>
- Lafortezza, R., Chen, J., van den Bosch, C. K., & Randrup, T. B. (2018). Nature-based solutions for resilient landscapes and cities. *Environmental Research*, 165, 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.038>
- Lawler, J. J. (2009). Climate change adaptation strategies for resource management and conservation planning. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1162, 79–98. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04147.x>
- Lee, K. E., Williams, K. J. H., Sargent, L. D., Farrell, C., & Williams, N. S. (2014). Living roof preference is influenced by plant characteristics and diversity. *Landscape and Urban Planning*, 122, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.09.011>
- Lee, L. S. H., & Jim, C. Y. (2019). Urban woodland on intensive green roof improved outdoor thermal comfort in subtropical summer. *International Journal of Biometeorology*, 63(7), 895–909. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01702-4>

- Lee, L. S. H., & Jim, C. Y. (2020). Thermal-irradiance behaviours of subtropical intensive green roof in winter and landscape-soil design implications. *Energy and Buildings*, 209, 109692. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109692>
- Li, J., Ossokina, I., & Arentze, T. (2024). The spatial planning of housing and urban green space: A combined stated choice experiment and land-use modeling approach. *Land Use Policy*, 145, 107252. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107252>
- Liberalesso, T., Oliveira Cruz, C., Matos Silva, C., & Manso, M. (2020). Green infrastructure and public policies: An international review of green roofs and green walls incentives. *Land Use Policy*, 96(June 2019), 104693. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104693>
- Lin, B. S., Yu, C. C., Su, A. T., & Lin, Y. J. (2013). Impact of climatic conditions on the thermal effectiveness of an extensive green roof. *Building and Environment*, 67, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.026>
- Litardo, J., Palme, M., Borbor-cordova, M., Caiza, R., Macias, J., & Hidalgo-leon, R. (2020). Urban Heat Island intensity and buildings ' energy needs in Duran , Ecuador : Simulation studies and proposal of mitigation strategies. *Sustainable Cities and Society*, 62(February), 102387. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102387>
- Liu, H., Kong, F., Yin, H., Middel, A., Zheng, X., Huang, J., Xu, H., Wang, D., & Wen, Z. (2021). Impacts of green roofs on water, temperature, and air quality: A bibliometric review. *Building and Environment*, 196, 107794. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.107794>
- Loder, A. (2014). "There's a meadow outside my workplace": A phenomenological exploration of aesthetics and green roofs in Chicago and Toronto. *Landscape and Urban Planning*, 126, 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.008>
- López-Angulo, G., Díaz-Camacho, S. P., Heredia-Mercado, B., Montes-Avila, J., & Delgado-Vargas, F. (2022). Adaptogenic, immunomodulatory, and antioxidant activities of three Echeveria species (Crassulaceae). *South African Journal of Botany*, 151, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.10.001>
- López-González, B. G., Camacho, A. D., Martínez-Rodríguez, M. C., & Marcelin- Aranda, M. (2020). Techos verdes: una estrategia sustentable. *Revista Tecnología En Marcha*, 33, 68–79. <https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4389>
- Lovera Pons, V., Roldán Aragón, I. E., Sánchez Robles, J., & Torres Lima, P. (2018). Evaluation of the service ecosystem of water yield from an analysis of the landscape in the municipality of Valle de Bravo, Mexico. *Papeles de Geografía*, 64, 93–113. <https://doi.org/10.6018/geografia/2018/322931>
- Lu, J., Wang, C., Zhang, C., Guan, H., Skare, M., & Streimikisv, J. (2021). Avoided external energy costs due to penetration of renewables: Evidence form Baltic States. *Journal of Environmental Management*, 296, 113247. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113247>
- Luckett, K. (2009). *Green Roof Construction and Maintenance*. Mc Graw Hill.
- Lundholm, J. T. (2015). Green roof plant species diversity improves ecosystem multifunctionality. *Journal of Applied Ecology*, 52(3), 726–734. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12425>
- Luo, H., Huang, B., Liu, X., & Zhang, K. (2011). Green roof assessment by GIS and Google Earth. *Procedia Environmental Sciences*, 10(PART C), 2307–2313. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.360>
- Luo, H., Liu, X., Anderson, B. C., Zhang, K., Li, X., Huang, B., Li, M., Mo, Y., Fan, L., Shen, Q., Chen, F., & Jiang, M. (2015). Carbon sequestration potential of green roofs using mixed-sewage-sludge substrate in Chengdu World Modern Garden City. *Ecological Indicators*, 49, 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.10.016>
- Luo, T., Xue, X., Wang, Y., Xue, W., & Tan, Y. (2021). A systematic overview of prefabricated construction policies in China. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124371>
- Ma, Y., Li, X., Gu, Z., & Li, J. (2019). Leaf Color and Growth Change of Sedum rubrotinctum Caused by Two Commercial Chemical Products. *HortScience*, 54(3), 434–444. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13557-18>
- Maclvor, J. S., & Lundholm, J. (2011). Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecological Engineering*, 37(3), 407–417. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.10.004>

- MacIvor, J. S., Margolis, L., Perotto, M., & Drake, J. A. P. (2016). Air temperature cooling by extensive green roofs in Toronto Canada. *Ecological Engineering*, 95, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.050>
- Macke, J., Rubim Sarate, J. A., & de Atayde Moschen, S. (2019). Smart sustainable cities evaluation and sense of community. *Journal of Cleaner Production*, 239, 118103. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118103>
- Magaña, V., Ábrego Góngora, C. J., & Méndez Antonio, B. (2024). El clima cambiante y los consumos domésticos de agua en ciudades de México. *Investigaciones Geográficas*, 114. <https://doi.org/10.14350/rig.60850>
- Magni, G. (2017). Indigenous knowledge and implications for the sustainable development agenda. *European Journal of Education*, 52(4), 437–447. <https://doi.org/10.1111/ejed.12238>
- Mahdiyari, A., Tabatabaee, S., Abdullah, A., & Marto, A. (2018). Identifying and assessing the critical criteria affecting decision-making for green roof type selection. *Sustainable Cities and Society*, 39(March), 772–783. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.03.007>
- Maiolo, M., Pirouz, B., Bruno, R., Palermo, S. A., Arcuri, N., & Piro, P. (2020). The Role of the Extensive Green Roofs on Decreasing Building Energy Consumption in the Mediterranean Climate. *Sustainability*, 12(1), 359. <https://doi.org/10.3390/su12010359>
- Manso, M., Teotónio, I., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2021). Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135(November 2019). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111>
- Martin, J. G. C., Scolobig, A., Linnerooth-Bayer, J., Liu, W., & Balsiger, J. (2021). Catalyzing innovation: Governance enablers of nature-based solutions. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1–28. <https://doi.org/10.3390/su13041971>
- Matus Pérez, N. I. (2019). *Los asentamientos irregulares en la Ciudad de México y la Importancia de la definición de los problemas públicos* [Centro de Investigación y Docencia Económicas, A.C. (CIDE)]. <http://repositorio-digital.cide.edu/bitstream/handle/11651/3880/165050.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mautner, M. R. L., Foglia, L., Herrera, G. S., Galán, R., & Herman, J. D. (2020). Urban growth and groundwater sustainability: Evaluating spatially distributed recharge alternatives in the Mexico City Metropolitan Area. *Journal of Hydrology*, 586, 124909. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124909>
- Mayoral, J. M., & Pérez, M. (2024). Basin boundary seismic effects in Mexico City southern region. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(3), 845–876. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01812-w>
- Mayrand, F., & Clergeau, P. (2018). Green roofs and greenwalls for biodiversity conservation: A contribution to urban connectivity? *Sustainability (Switzerland)*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/su10040985>
- Mazzocchi, F. (2020). A deeper meaning of sustainability: Insights from indigenous knowledge. *The Anthropocene Review*, 7(1), 77–93. <https://doi.org/10.1177/2053019619898888>
- McGranahan, G., & Satterthwaite, D. (2002). The Environmental Dimensions of Sustainable Development for Cities. *Geography*, 87(3), 213–226. <https://doi.org/10.1080/20436564.2002.12219844>
- Mendez-Astudillo, J., Caetano, E., & Pereyra-Castro, K. (2022). Synergy between the Urban Heat Island and the Urban Pollution Island in Mexico City during the Dry Season. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(8), 210278. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210278>
- Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
- Mersal, A. (2016). Sustainable Urban Futures: Environmental Planning for Sustainable Urban Development. *Procedia Environmental Sciences*, 34, 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.005>
- Mesimäki, M., Hauru, K., & Lehvävirta, S. (2019). Urban Forestry & Urban Greening Do small green roofs have the possibility to offer recreational and experiential benefits in a dense urban area? A case study in Helsinki. *Urban Forestry & Urban Greening*, 40(September 2018), 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.10.005>

- Mesimäki, M., Hauru, K., Kotze, D. J., & Lehvävirta, S. (2017). Neo-spaces for urban livability? Urbanites' versatile mental images of green roofs in the Helsinki metropolitan area, *Finland. Land Use Policy*, *61*, 587–600. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.11.021>
- Meyar-Naimi, H., & Vaez-Zadeh, S. (2012). Sustainable development based energy policy making frameworks, a critical review. *Energy Policy*, *43*, 351–361. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.012>
- Mihalakakou, G., Souliotis, M., Papadaki, M., Menounou, Penelope Dimopoulos, P., Kolokotsa, D., Paravantis, J. A., Tsangrassoulis, A., Panaras, G., Giannakopoulos, E., & Papaefthimiou, S. (2023). Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *180*(113306). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113306>
- Ministerio de Vivienda Colombia. (2021). Proyecto 207/2021C. *Techos verdes*. Comisión Quinta Constitucional Permanente. <https://www.camara.gov.co/imprimir/techos-verdes>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo Chile. (2020). NCh 3626:2020 para la construcción de Techos verdes. *Techos verdes*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). Ecosistemas y conectividad. *Estrategia Nacional de Infraestructura Verde y de la Conectividad y Restauración Ecológicas*.
- Miquelajauregui, Y., López-Espinoza, E. D., Luna Pérez, E., Gómez-Priego, P., Bojórquez-Tapia, L. A., Aquino Martínez, L. P., & Quintanar, A. I. (2024). Impacts of projected urban growth on simulated near-surface temperature in Mexico City Metropolitan Area: Implications for urban vulnerability. *PLOS Climate*, *3*(4), e0000396. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000396>
- Mithraratne, N. (2013). Carbon footprint of green roofs in Singapore. *Proceedings of the Sustainable Buildings - Construction Products and Technologies*, 629–637.
- Mitrovic, S. (2010). *Action plan for sustainable city of Toronto Case study of green roofs*. 1–12.
- Montejano-Castillo, M., Moreno-Villanueva, M., & Espinosa-Jiménez, E. (2020). Mapping Vertical Urban Growth in Mexico City in a Seismic Risk Context. *International Journal of Safety and Security Engineering*, *10*(1), 97–103. <https://doi.org/10.18280/ijss.100113>
- Montréal. (2020, December). *Plan and Strategy*. Montréal Climate Plan: Objective Carbon-Neutral by 2050.
- Moroni, M., Porti, M., & Piro, P. (2019). Design of a Remote-Controlled Platform for Green Roof Plants Monitoring via Hyperspectral Sensors. *Water*, *11*(7), 1368. <https://doi.org/10.3390/w11071368>
- Motohka, T., Nasahara, K. N., Oguma, H., & Tsuchida, S. (2010). Applicability of Green-Red Vegetation Index for Remote Sensing of Vegetation Phenology. *Remote Sensing*, *2*(10), 2369–2387. <https://doi.org/10.3390/rs2102369>
- Muhamad Nor, A. N., Abdul Aziz, H., Nawawi, S. A., Muhammad Jamil, R., Abas, M. A., Hambali, K. A., Yusoff, A. H., Ibrahim, N., Rafeai, N. H., Corstanje, R., Harris, J., Grafius, D., & Perotto-Baldivieso, H. L. (2021). Evolution of Green Space under Rapid Urban Expansion in Southeast Asian Cities. *Sustainability*, *13*(21), 12024. <https://doi.org/10.3390/su132112024>
- Município de Lisboa. (2023). *Towards a more resilient Lisbon Urban Green Infrastructure as an adaptation to climate change - LIFE18 CCA/PT/001170*.
- Murphy, K. (2012). The social pillar of sustainable development: a literature review and framework for policy analysis. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, *8*(1), 15–29. <https://doi.org/10.1080/15487733.2012.11908081>
- Mutani, G., & Todeschi, V. (2020). The Effects of Green Roofs on Outdoor Thermal Comfort, Urban Heat Island Mitigation and Energy Savings. *Atmosphere*, *11*(2), 123. <https://doi.org/10.3390/atmos11020123>
- Mutlu, A., Roy, D., & Filatova, T. (2023). Capitalized value of evolving flood risks discount and nature-based solution premiums on property prices. *Ecological Economics*, *205*, 107682. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107682>
- Næss, P. (2001). Urban Planning and Sustainable Development. *European Planning Studies*, *9*(4), 503–524. <https://doi.org/10.1080/713666490>
- Nahler, G. (2009). Cost/Benefit Analysis (CBA). In *Dictionary of Pharmaceutical Medicine* (pp. 41–41). Springer Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-211-89836-9_308

- Nasr, D., Al Sarraf, N., & EL Bachawati, M. (2024). Design and optimization of biochar production and incorporating it into green roofs for CO₂ capturing. *E3S Web of Conferences*, 585, 01005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458501005>
- Natural Resources Canada. (2024). The Canada Green Buildings Strategy: Transforming Canada's buildings sector for a net-zero and resilient future. In *Green buildings are affordable, livable and resilient*.
- Ndayambaje, P., Maclvor, J. S., & Cadotte, M. W. (2024). Plant diversity on green roofs: A review of the ecological benefits, challenges, and best management practices. *Nature-Based Solutions*, 6, 100162. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100162>
- New York City Mayor's Office of Environmental Coordination. (2024). Green Building Requirements. In *LEED® Rating Level Requirement*.
- New York City Mayor's Office of Climate and Sustainability. (2021). Climate Mobilization Act. In *Climate Mobilization Act*.
- Nguyen Dang, H.-A., Legg, R., Khan, A., Wilkinson, S., Ibbett, N., & Doan, A.-T. (2022). Social impact of green roofs. *Frontiers in Built Environment*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1047335>
- Nguyen Dang, H.-A., Legg, R., Khan, A., Wilkinson, S., Ibbett, N., & Doan, A.-T. (2023). Users' Perceptions of the Contribution of a University Green Roof to Sustainable Development. *Sustainability*, 15(8), 6772. <https://doi.org/10.3390/su15086772>
- Nieves, M. De, Antonio, J., Latinoamericana, T., Muratalla-lúa, S., Rodríguez-mendoza, M. D. N., & Sánchez-garcía, P. (2006). *PLÁNTULAS DE JITOMATE Corn Straw as Substrate in Growth of Tomato Seedlings*.
- Nika, C. E., Gusmaroli, L., Ghafourian, M., Atanasova, N., Buttiglieri, G., & Katsou, E. (2020). Nature-based solutions as enablers of circularity in water systems: A review on assessment methodologies, tools and indicators. *Water Research*, 183, 115988. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115988>
- Noble, I. R., Huq, S., Anokhin, Y. A., Carmin, J., Goudou, D., Lansigan, F. P., Osman-Elasha, B., & Villamiza, A. (2018). Adaptation Needs and Options. In A. Patt & K. Takeuchi (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 833–868). Cambridge University Press.
- Nomura, R., & Oki, K. (2021). Downscaling of MODIS NDVI by Using a Convolutional Neural Network-Based Model with Higher Resolution SAR Data. *Remote Sensing*, 13(4), 732. <https://doi.org/10.3390/rs13040732>
- Normativa Asociada, Pub. L. No. Ley N°21.455, Ley Marco de Cambio Climático (2022).
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>
- Núñez, J. M. (2021). Análisis espacial de las áreas verdes urbanas de la Ciudad de México. *Economía Sociedad y Territorio*, 803–833. <https://doi.org/10.22136/est20211661>
- Nußholz, J. L. K., Rasmussen, F. N., Whalen, K., & Plepys, A. (2020). Material reuse in buildings: Implications of a circular business model for sustainable value creation. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118546. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118546>
- Nyuk Hien, W., Puay Yok, T., & Yu, C. (2007). Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate. *Building and Environment*, 42(1), 25–54. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.030>
- Oberlack, C. (2017). Diagnosing institutional barriers and opportunities for adaptation to climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 22(5), 805–838. <https://doi.org/10.1007/s11027-015-9699-z>
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. K. Y., & Rowe, B. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *BioScience*, 57(10), 823–833. <https://doi.org/10.1641/b571005>
- Ode Sang, Å., Thorpert, P., & Fransson, A.-M. (2022). Planning, Designing, and Managing Green Roofs and Green Walls for Public Health – An Ecosystem Services Approach. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.804500>

- OECD. (2015). *Climate Change Risks and Adaptation*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264234611-en>
- Ortiz-Oliveros, H. B., Mendoza-Guzmán, M. M., Zarazúa-Ortega, G., Lara-Almazán, N., Mestizo-Gutiérrez, S. L., & González-Ruiz, A. (2024). Evaluation of succulent plants *Echeveria elegans* as a biomonitor of heavy metals and radionuclides. *Environmental Research*, 251, 118611. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118611>
- Ou, Y., Roney, C., Alsalam, J., Calvin, K., Creason, J., Edmonds, J., Fawcett, A. A., Kyle, P., Narayan, K., O'Rourke, P., Patel, P., Ragnauth, S., Smith, S. J., & McJeon, H. (2021). Deep mitigation of CO₂ and non-CO₂ greenhouse gases toward 1.5 °C and 2 °C futures. *Nature Communications*, 12(1), 6245. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26509-z>
- Palma, A., Parker, T. K., & Carmona-Paredes, R. B. (2022). Challenges and Experiences of Managed Aquifer Recharge in the Mexico City Metropolitan Area. *Groundwater*, 60(5), 675–684. <https://doi.org/10.1111/gwat.13237>
- Palma, A., Rivera, A., & Carmona, R. (2022). A Unified Hydrogeological Conceptual Model of the Mexico Basin Aquifer after a Century of Groundwater Exploitation. *Water*, 14(10), 1584. <https://doi.org/10.3390/w14101584>
- Panteleeva, M., & Borozdina, S. (2021). Sustainable Urban Development Strategic Initiatives. *Sustainability*, 14(1), 37. <https://doi.org/10.3390/su14010037>
- Pareja-Eastaway, M. (2012). Social Sustainability. In *International Encyclopedia of Housing and Home* (pp. 502–505). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-047163-1.00571-3>
- Park, J., Shin, Y., Kim, S., Lee, S. W., & An, K. (2022). Efficient Plant Types and Coverage Rates for Optimal Green Roof to Reduce Urban Heat Island Effect. *Sustainability (Switzerland)*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/su14042146>
- Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A. (2005). Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438(7066), 310–317. <https://doi.org/10.1038/nature04188>
- Pearce, D. (1998). Cost benefit analysis and environmental policy. *Oxford Review of Economic Policy*, 14(4), 84–100. <https://doi.org/10.1093/oxrep/14.4.84>
- Peñalvo-López, E., Cárcel-Carrasco, J., Alfonso-Solar, D., Valencia-Salazar, I., & Hurtado-Pérez, E. (2020). Study of the improvement on energy efficiency for a building in the mediterranean area by the installation of a green roof system. *Energies*, 13(5), 1–14. <https://doi.org/10.3390/en13051246>
- Pérez, G., Coma, J., Solé, C., Castell, A., & Cabeza, L. F. (2012). Green roofs as passive system for energy savings when using rubber crumbs as drainage layer. *Energy Procedia*, 30, 452–460. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.054>
- Pignattelli, S., Broccoli, A., Piccardo, M., Terlizzi, A., & Renzi, M. (2021). Effects of polyethylene terephthalate (PET) microplastics and acid rain on physiology and growth of *Lepidium sativum*. *Environmental Pollution*, 282, 116997. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116997>
- Pique, L., Blanchet, P., & Breton, C. (2023). Global warming potential comparison between green and conventional roofs in cold climate using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138314>
- Pirouz, B., Palermo, S. A., & Turco, M. (2021). Improving the efficiency of green roofs using atmospheric water harvesting systems (An innovative design). *Water (Switzerland)*, 13(4), 1–19. <https://doi.org/10.3390/w13040546>
- Pizer, W. A. (2006). The Evolution of a Global Climate Change Agreement. *American Economic Review*, 96(2), 26–30. <https://doi.org/10.1257/000282806777211793>
- Pratama, H. C., Sinsiri, T., & Chapirom, A. (2023). Green Roof Development in ASEAN Countries: The Challenges and Perspectives. *Sustainability*, 15(9), 7714. <https://doi.org/10.3390/su15097714>
- Presidência do Conselho de Ministros. (2020a). Decreto-Lei n.o 101-D/2020, de 7 de dezembro. In *Decreto-Lei n.o 101-D/2020, de 7 de dezembro (N. o 101-D/2020)*.
- Presidência do Conselho de Ministros. (2020b). Resolução do Conselho de Ministros n.o 53/2020. In *Resolução do Conselho de Ministros n.o 53/2020, de 10 de julho (N. o 53/2020)*.
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del DF (PAOT). (2021). *Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal (LAPTFD)*.

- Puchol-Salort, P., O'Keeffe, J., van Reeuwijk, M., & Mijic, A. (2021). An urban planning sustainability framework: Systems approach to blue green urban design. *Sustainable Cities and Society*, 66, 102677. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102677>
- Qiu, G., Li, H. yong, Zhang, Q. tao, Chen, W., Liang, X. jian, & Li, X. ze. (2013). Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(8), 1307–1315. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60543-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60543-2)
- Quintero, S., & González, L. (2006). Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. *Ingeniería y Desarrollo*, 20, 134–150. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85202010>
- Quiñónez, M. (2014). *Uso de la fibra de coco como sustrato en la producción de pascua (Euphorbia pulcherrima; Wild.Ex Klotsch) para exportación; agroindustrias Jovisa, San Miguel Dueñas, Sacatepequez (2007-2010). Estudio de caso.* Universidad Rafael Landívar.
- Rahim, R., & Abdul Raman, A. A. (2017). Carbon dioxide emission reduction through cleaner production strategies in a recycled plastic resins producing plant. *Journal of Cleaner Production*, 141, 1067–1073. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.023>
- Raju, K. V., Ravindra, A., Manasi, S., Smitha, K. C., & Srinivas, R. (2018). *Urban Environment Laws and Governance* (pp. 49–66). https://doi.org/10.1007/978-3-319-73468-2_4
- Rakhmankulova, Z. F., Terletskaya, N. V., Shuyskaya, E. V., Saidova, L. T., Prokofieva, M. Yu., Kenzhebaeva, Zh. A., & Lapshin, P. V. (2023). Regulation of the Degree of Manifestation of Obligate CAM Pathway in Sedum dendroideum by Salinity. *Russian Journal of Plant Physiology*, 70(9), 215. <https://doi.org/10.1134/S1021443724603781>
- Rasul, M. G., & Arutla, L. K. R. (2020). Environmental impact assessment of green roofs using life cycle assessment. *Energy Reports*, 6, 503–508. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.015>
- Razzaghamanesh, M., Beecham, S., & Brien, C. J. (2014). Developing resilient green roofs in a dry climate. *Science of The Total Environment*, 490, 579–589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.040>
- Razzaghamanesh, M., Beecham, S., & Salemi, T. (2016). The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. *Urban Forestry and Urban Greening*, 15, 89–102. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.11.013>
- Rezaei, M., Emmanuel, N., Kim, J., & Kim, D. H. (2021). Analyzing the impact of green roof functions on the citizens' mental health in metropolitan cities. *Iranian Journal of Public Health*, 50(5), 900–907. <https://doi.org/10.18502/ijph.v50i5.6107>
- Riffat, S., Powell, R., & Aydin, D. (2016). Future cities and environmental sustainability. *Future Cities and Environment*, 2(0), 1. <https://doi.org/10.1186/s40984-016-0014-2>
- Ringsred, A., Van Dyk, S., & Saddler, J. (2021). Life-cycle analysis of drop-in biojet fuel produced from British Columbia forest residues and wood pellets via fast-pyrolysis. *Applied Energy*, 287. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116587>
- Ríos-Sánchez, K. I., Chamizo-Checa, S., Galindo-Castillo, E., Acevedo-Sandoval, O. A., González-Ramírez, C. A., Hernández-Flores, M. de la L., & Otazo-Sánchez, E. M. (2024). The Groundwater Management in the Mexico Megacity Peri-Urban Interface. *Sustainability*, 16(11), 4801. <https://doi.org/10.3390/su16114801>
- Rocque, R. J., Beaudoin, C., Ndjaboue, R., Cameron, L., Poirier-Bergeron, L., Poulin-Rheault, R.-A., Fallon, C., Tricco, A. C., & Wittman, H. O. (2021). Health effects of climate change: an overview of systematic reviews. *BMJ Open*, 11(6), e046333. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-046333>
- Rodrigues de Aguiar, C., Klemm, J., & Cristiani, T. (2020). Multicriteria GIS-Based Approach in Priority Areas Analysis for Sustainable Urban Drainage Practices: A Case Study of Pato Branco, Brazil. *Eng*, 1(2), 96–111. <https://doi.org/10.3390/eng1020006>
- Rosasco, P., & Perini, K. (2019). Selection of (Green) Roof Systems: A Sustainability-Based Multi-Criteria Analysis. *Buildings*, 9(5), 134. <https://doi.org/10.3390/buildings9050134>
- Rowe, D. B., & Getter, K. L. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276–1285.
- Sailor, D. J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40(8), 1466–1478. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.001>

- Salinas Arreortua, L. A., & Soto Delgado, L. (2019). Política de vivienda en México: entre la expansión y el retorno al centro. *Investigaciones Geográficas*, 99. <https://doi.org/10.14350/ig.59751>
- Sandoval-Rivera, J. C. A. (2020). Environmental education and indigenous knowledge: Towards the connection of local wisdom with international agendas in the framework of the Sustainable Development Goals (SDGs). *Diaspora, Indigenous, and Minority Education*, 14(1), 14–24. <https://doi.org/10.1080/15595692.2019.1652588>
- Santa Ana, L., & Santa Ana, P. (2021). RBL through analysis of the development of high-rise buildings in Mexico City (1900–1952). In *History of Construction Cultures* (pp. 410–415). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003173359-53>
- Santa Ana, P., Santa Ana, L., & Baez, J. (2021). Foundation Development from 1890-1942 for Long Span and High Rise Buildings at Mexico City. *12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*. <https://doi.org/10.23967/sahc.2021.115>
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682–703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Sassen, S. (2005). The Global City: Introducing a Concept. *The Brown Journal of World Affairs*, 11(2), 27–43. <https://www.jstor.org/stable/24590544>
- Schaur, A., Unterberger, S., & Lackner, R. (2017). Impact of molecular structure of SBS on thermomechanical properties of polymer modified bitumen. *European Polymer Journal*, 96, 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.09.017>
- Schwarz, A. E., Lighthart, T. N., Godoi Bizarro, D., De Wild, P., Vreugdenhil, B., & van Harmelen, T. (2021). Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach. *Waste Management*, 121, 331–342. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.020>
- Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil. (2021). Atlas de riesgo - *Índice de vulnerabilidad social*.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2018). *Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2017*, que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en la Ciudad de México.
- Seddon, N., Smith, A., Smith, P., Key, I., Chausson, A., Girardin, C., House, J., Srivastava, S., & Turner, B. (2021). Getting the message right on nature-based solutions to climate change. *Global Change Biology*, 27(8), 1518–1546. <https://doi.org/10.1111/gcb.15513>
- SEDEMA. (2022). *Sembrando Parques. Acciones*. <https://gobierno.cdmx.gob.mx/acciones/sembrando-parques/#:~:text=Sembrando%20Parques%20es%20una%20iniciativa,los%20habitantes%20de%20la%20Ciudad>.
- Semeraro, T., Scarano, A., Buccolieri, R., Santino, A., & Aarvevaara, E. (2021). Planning of Urban Green Spaces: An Ecological Perspective on Human Benefits. *Land*, 10(2), 105. <https://doi.org/10.3390/land10020105>
- Seyedabadi, M. R., Karrabi, M., & Nabati, J. (2022). Investigating green roofs' CO2 sequestration with cold- and drought-tolerant plants (a short- and long-term carbon footprint view). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(10), 14121–14130. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16750-w>
- Seyedabadi, M. R., Karrabi, M., Nabati, J., & Rowe, D. B. (2024). Long-term effectiveness of green roofs in building sustainability through carbon emission and sequestration. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05597-z>
- Shafique, M., Xue, X., & Luo, X. (2020). An overview of carbon sequestration of green roofs in urban areas. *Urban Forestry and Urban Greening*, 47(October 2019), 126515. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126515>
- Shou, T. (2022). A Literature Review on the Net Present Value (NPV) Valuation Method. *2nd International Conference on Enterprise Management and Economic Development (ICEMED)*. <https://doi.org/10.2991/aebmr.k.220603.135>
- Smith, B., Burton, I., Klein, R. J. T., & Wandel, J. (2000). Adaptation to Climate Change in the Context of Sustainable Development. *Climatic Change*, 45(1), 223–251. <https://doi.org/10.1023/A:1005661622966>

- Sněhota, M., Hanzlíková, J., Sobotková, M., & Moravcik, P. (2021). Water and thermal regime of extensive green roof test beds planted with sedum cuttings and sedum carpets. *Journal of Soils and Sediments*, 21(5), 2089–2101. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02778-x>
- Sosa Baldivia, A., & Ruíz Ibarra, G. (2017). La disponibilidad de alimentos en México: Un análisis de la producción agrícola de 35 años y su proyección para 2050. *Papeles de Poblacion*, 23(93), 207–230. <https://doi.org/10.22185/24487147.2017.93.027>
- Speak, A. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J., & Smith, C. L. (2013). Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. *Science of the Total Environment*, 461–462, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.085>
- State of California. (2022). The California Green Building Standards. In *California Green Building Standards Code (CALGREEN)*. State of California.
- Strezov, V., Evans, A., & Evans, T. J. (2017). Assessment of the Economic, Social and Environmental Dimensions of the Indicators for Sustainable Development. *Sustainable Development*, 25(3), 242–253. <https://doi.org/10.1002/sd.1649>
- Suárez, A., Camarena, P., Herrera, I., & Lot, A. (2011). Infraestructura verde y corredores ecológicos de los predigales: ecología urbana del sur de la Ciudad de México. In *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Szota, C., Farrell, C., Williams, N. S. G., Arndt, S. K., & Fletcher, T. D. (2017). Drought-avoiding plants with low water use can achieve high rainfall retention without jeopardising survival on green roofs. *Science of The Total Environment*, 603–604, 340–351. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.061>
- Tansar, H., Duan, H.-F., & Mark, O. (2023). A multi-objective decision-making framework for implementing green-grey infrastructures to enhance urban drainage system resilience. *Journal of Hydrology*, 620, 129381. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129381>
- Teotónio, I., Cabral, M., Cruz, C. O., & Silva, C. M. (2020). Decision support system for green roofs investments in residential buildings. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119365. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119365>
- Teotónio, I., Cruz, C. O., Silva, C. M., & Morais, J. (2020). Investing in sustainable built environments: The willingness to pay for green roofs and greenwalls. *Sustainability (Switzerland)*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/SU12083210>
- Teotónio, I., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2018). Eco-solutions for urban environments regeneration: The economic value of green roofs. *Journal of Cleaner Production*, 199, 121–135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.084>
- Teotónio, I., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2021). Economics of green roofs and green walls: A literature review. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102781. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102781>
- Terri, J. A., Turner, M., & Gurevitch, J. (1986). The Response of Leaf Water Potential and Crassulacean Acid Metabolism to Prolonged Drought in *Sedum rubrotinctum*. *Plant Physiology*, 81(2), 678–680. <https://doi.org/10.1104/pp.81.2.678>
- Tompkins, E. L., & Eakin, H. (2012). Managing private and public adaptation to climate change. *Global Environmental Change*, 22(1), 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.09.010>
- Tsantopoulos, G., Varras, G., Chiotelli, E., Fotia, K., & Batou, M. (2018). Public perceptions and attitudes toward green infrastructure on buildings: The case of the metropolitan area of Athens, Greece. *Urban Forestry and Urban Greening*, 34(June 2017), 181–195. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.06.017>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2016). *Climate Change Adaptation Resource Center*. Chicago, IL Uses Green Infrastructure to Reduce Extreme Heat.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2018). Estimating the environmental effects of Green roofs: A case study in Kansas City, Missouri. In *EPA 430-S-18-001*. www.epa.gov/heat-islands/using-green-roofs-reduce-heat-islands.
- U.S. General Services Administration. (2024a). *Federal High-Performance Green Buildings*. Green Roofs.
- U.S. General Services Administration. (2024b). *Sustainable Facilities Tool*. System Overview.
- Ulewicz, R., & Blaskova, M. (2018). Sustainable development and knowledge management from the stakeholders' point of view. *Polish Journal of Management Studies*, 18(2), 363–374. <https://doi.org/10.17512/pjms.2018.18.2.29>

- UN Habitat. (2014, September). *The Atlas of Urban Expansion*. Cities.
- UN Habitat. (2016). *UN Habitat*. For a better urban future. Climate Change. <https://unhabitat.org/topic/climate-change>
- Unidad de Medio Ambiente y Bienestar Animal. (2021). *Plan Municipal de Infraestructura Verde (PMIV)*.
- United States Geological Survey (USGS). (2024, September). *USGS Earth Explorer*. Earth Explorer.
- Uttaruk, Y., & Laosuwan, T. (2016). ESTIMATING ABOVE GROUND CARBON CAPTURE USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY IN SMALL SCALE AGROFORESTRY AREAS. *The Journal "Agriculture and Forestry,"* 62(2). <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.62.2.22>
- Vanstockem, J., Vranken, L., Bleys, B., Somers, B., & Hermy, M. (2018). Do looks matter? A case study on extensive green roofs using discrete choice experiments. *Sustainability (Switzerland),* 10(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su10020309>
- Vargas, M. A., Chávez, A. E., Herrera, R., & Manero, O. (2005). Asphalt Modified by Partially Hydrogenated SBS Tri-Block Copolymers. *Rubber Chemistry and Technology,* 78(4), 620–643. <https://doi.org/10.5254/1.3547902>
- Vasl, A., Shalom, H., Kadas, G. J., & Blaustein, L. (2017). Sedum —Annual plant interactions on green roofs: Facilitation, competition and exclusion. *Ecological Engineering,* 108, 318–329. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.034>
- Vela Peón, F. (2001). Un acto metodológico básico de la investigación social: la entrevista cualitativa. In *Observar, Escuchar y Comprender sobre la tradición cualitativa en la investigación social* (pp. 63–117).
- Venter, Z. S., Barton, D. N., Martínez-Izquierdo, L., Langemeyer, J., Baró, F., & McPhearson, T. (2021). Interactive spatial planning of urban green infrastructure – Retrofitting green roofs where ecosystem services are most needed in Oslo. *Ecosystem Services,* 50, 101314. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101314>
- Vogt-Schilb, A., Meunier, G., & Hallegatte, S. (2018). When starting with the most expensive option makes sense: Optimal timing, cost and sectoral allocation of abatement investment. *Journal of Environmental Economics and Management,* 88, 210–233. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.12.001>
- Wan Ismail, W. Z., Abdullah, M. N., & Che-Ani, A. I. (2019). A review of factors affecting carbon sequestration at green roofs. *Journal of Facilities Management,* 17(1), 76–89. <https://doi.org/10.1108/JFM-11-2017-0069>
- Wang, J. W., Poh, C. H., Tan, C. Y. T., Lee, V. N., Jain, A., & Webb, E. L. (2017). Building biodiversity: Drivers of bird and butterfly diversity on tropical urban roof gardens. *Ecosphere,* 8(9). <https://doi.org/10.1002/ecs2.1905>
- Wang, J., Garg, A., Huang, S., Mei, G., Liu, J., Zhang, K., & Gan, L. (2021). The rainwater retention mechanisms in extensive green roofs with ten different structural configurations. *Water Science and Technology,* 84(8), 1839–1857. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.413>
- Wang, Y., Berardi, U., & Akbari, H. (2016). Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. *Energy and Buildings,* 114, 2–19. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>
- Wang, Y., Kong, F., Yin, H., Su, J., & Sun, H. (2023). Identifying the right building roofs for greening from the perspective of socio-ecological demands in a 3D urban landscape. *Landscape and Ecological Engineering,* 19(3), 351–362. <https://doi.org/10.1007/s11355-023-00559-5>
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment,* 89(4), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Wetekamp, W. (2011). Net Present Value (NPV) as a tool supporting effective project management. *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems,* 898–900. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2011.6072902>
- Wilkinson, S. J., Ghosh, S., & Pelleri, N. (2024). Mandatory or voluntary approaches to green roof implementation: a comparative study among some global cities. *Journal of Environmental Planning and Management,* 67(2), 334–355. <https://doi.org/10.1080/09640568.2022.2113768>

- Wilkinson, S., & Feitosa, R. (2015). Retrofitting Housing with Lightweight Green Roof Technology in Sydney, Australia, and Rio de Janeiro, Brazil. *Sustainability*, 7(1), 1081–1098. <https://doi.org/10.3390/su7011081>
- Williams, K. J. H., Lee, K. E., Sargent, L., Johnson, K. A., Rayner, J., Farrell, C., Miller, R. E., & Williams, N. S. G. (2019). Appraising the psychological benefits of green roofs for city residents and workers. *Urban Forestry & Urban Greening*, 44(July), 126399. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126399>
- Wolch, J. R., Byrne, J., & Newell, J. P. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough.' *Landscape and Urban Planning*, 125, 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.017>
- Wooster, E. I. F., Fleck, R., Torpy, F., Ramp, D., & Irga, P. J. (2022). Urban green roofs promote metropolitan biodiversity: A comparative case study. *Building and Environment*, 207, 108458. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108458>
- World Commission on Environment and Development (WCED). (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development*. <https://www.are.admin.ch/are/en/home/media/publications/sustainable-development/brundtland-report.html>
- Yan, Y., Wang, C., Quan, Y., Wu, G., & Zhao, J. (2018). Urban sustainable development efficiency towards the balance between nature and human well-being: Connotation, measurement, and assessment. *Journal of Cleaner Production*, 178, 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.013>
- Yang, B., & Lee, D. (2021). Urban Green Space Arrangement for an Optimal Landscape Planning Strategy for Runoff Reduction. *Land*, 10(9), 897. <https://doi.org/10.3390/land10090897>
- Yang, J., Yu, Q., & Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, 42(31), 7266–7273. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.003>
- Yang, M., Fu, J., Alee, M., Duan, Q., Xie, H., Ali, A., Liu, H., Chen, L., & Yu, L. (2023). Improving water resistance property of starch straw by synergistic effects of chemical crosslinking, physical barrier, and surface modifications. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(31). <https://doi.org/10.1002/app.54210>
- Yin, G., Verger, A., Descals, A., Filella, I., & Peñuelas, J. (2022). A Broadband Green-Red Vegetation Index for Monitoring Gross Primary Production Phenology. *Journal of Remote Sensing*, 2022. <https://doi.org/10.34133/2022/9764982>
- Yoder, B. J., & Waring, R. H. (1994). The normalized difference vegetation index of small Douglas-fir canopies with varying chlorophyll concentrations. *Remote Sensing of Environment*, 49(1), 81–91. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90061-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90061-2)
- Yu, S., Yu, B., Song, W., Wu, B., Zhou, J., Huang, Y., Wu, J., Zhao, F., & Mao, W. (2016). View-based greenery: A three-dimensional assessment of city buildings' green visibility using Floor Green View Index. *Landscape and Urban Planning*, 152, 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.04.004>
- Zaman, A. U., & Lehmann, S. (2011). Urban growth and waste management optimization towards "zero waste city." *City, Culture and Society*, 2(4), 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.ccs.2011.11.007>
- Zarta Ávila, P. (2018). La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad. *Tabula Rasa*, 28, 409–423. <https://doi.org/10.25058/20112742.n28.18>
- Zhang, G., He, B. J., & Dewancker, B. J. (2020). The maintenance of prefabricated green roofs for preserving cooling performance: A field measurement in the subtropical city of Hangzhou, China. *Sustainable Cities and Society*, 61(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102314>
- Zhang, K., Garg, A., Mei, G., Jiang, M., Wang, H., Huang, S., & Gan, L. (2022). Thermal performance and energy consumption analysis of eight types of extensive green roofs in subtropical monsoon climate. *Building and Environment*, 216, 108982. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108982>
- Zhang, X., Zhang, Y., & Zhai, J. (2021). Home Garden With Eco-Healing Functions Benefiting Mental Health and Biodiversity During and After the COVID-19 Pandemic: A Scoping Review. *Frontiers Public Health* 9(May), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.740187>

- Zhang, Y., Zhang, L., Ma, L., Meng, Q., & Ren, P. (2019). Cooling Benefits of an Extensive Green Roof and Sensitivity Analysis of Its Parameters in Subtropical Areas. *Energies*, 12(22). <https://doi.org/10.3390/en12224278>
- Zheng, X., Yang, Z., Yang, J., Tang, M., & Feng, C. (2022). An experimental study on the thermal and energy performance of self-sustaining green roofs under severe drought conditions in summer. *Energy and Buildings*, 261, 111953. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111953>
- Zhu, D., Fraser, L., Kendal, D., Zhang, Y., & Flies, E. J. (2023). Nature-based solutions in Australia: a systematic quantitative literature review of terms, application and policy relevance. *BioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2023.05.11.538642>

ANEXO 1

Tabla A 1. Inventario y captura de CO₂ en los techos verdes en la CDMX

ID	Alcaldía	Nombre	Ubicación	Tipo de techo verde	Superficie (m ²)	Año de instalación	Captura de CO ₂	
							Kg/m ² * Año	ppm/m ² * Año
1	Álvaro Obregón	Oficinas centrales Infonavit	Barranca del Muerto 280, Guadalupe Inn, Álvaro Obregón, 01020 Ciudad de México, CDMX	Intensivo	3,833.00	2011	33.8117	2.28E-02
2	Álvaro Obregón	Munavi - Infonavit	Barranca del Muerto 280, Guadalupe Inn, Álvaro Obregón, 01020 Ciudad de México, CDMX	Intensivo	1,171.13	2021	7.5618	5.10E-03
3	Álvaro Obregón	Hospital General Dr. Enrique Cabrera	Av. Centenario 3170, Mina los Coyotes, Álvaro Obregón, 01618 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	2,490.00	2013	29.2314	1.97E-02
4	Álvaro Obregón	American School Foundation (ASF): Fine Arts Center (FAC)	Bondojito 213, Las Américas, Álvaro Obregón, 01120 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	751.19	2012	31.2588	2.11E-02
5	Álvaro Obregón	American School Foundation (ASF): Wellness Center (WEC)	Bondojito 213, Las Américas, Álvaro Obregón, 01120 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	740.54	2012	31.476	2.12E-02
6	Álvaro Obregón	Casa particular	#407 Monte Himalaya, Col. Lomas de Chapultepec V sección, Álvaro Obregón CDMX	Extensivo	615.67	2007	45.2268	3.05E-02
7	Álvaro Obregón	Centro comercial Artz Pedregal	Periférico Sur 3720. Jardines del Pedregal, 01900. Ciudad de México	Intensivo	4,199.44	2018	15.6408	1.06E-02
8	Benito Juárez	Central Motzorongo Oficinas	. Eje Central Lázaro Cárdenas 425, Narvarte Oriente, Benito Juárez, 03020 Ciudad de México, CDMX	Semi-intensivo	165.92	2008	41.5456	2.80E-02

9	Coyoacán	IEMS Plantel Coyoacán	Calzada de Tlalpan 3463 y 3465, Col. Viejo Ejido de Santa Úrsula Del. Coyoacán. C.P.04650	Extensivo	2,222.80	2008	42.4144	2.86E-02
10	Coyoacán	Coordinación de la Investigación Científica	Investigación científica sn, Copilco el Alto, Coyoacán, 04510 Ciudad de México, CDMX	Semi - intensivo	400	2015	24.1344	1.63E-02
11	Coyoacán	Jardín botánico Instituto de biología - UNAM.	C.U. Coyoacán, C.P. 04510	Extensivo	260	1999	67.0325	4.52E-02
12	Coyoacán	Industria Productos MEDIX.	Calz. del Hueso 39, Coapa, Ejido Viejo de Sta. Úrsula Coapa, Coyoacán, 04650 Ciudad de México, CDMX	Semi - intensivo	344.91	2016	21.3288	1.44E-02
13	Coyoacán	Corporativo Grupo Vitalmex.	Anillo Perif. 4284, Jardines del Pedregal de San ángel, Coyoacán, 04500 Ciudad de México, CDMX	Intensivo	755.51	2013	28.1908	1.90E-02
14	Coyoacán	Escuela Secundaria Técnica N° 14 Cinco de Mayo	Centro de educación secundaria, Av. Coyoacán s/n, Del Valle, Benito Juárez 3100	Extensivo	177.79	2008	42.6064	2.88E-02
15	Cuajimalpa de Morelos	Jardín Contemplativo. Costco Wholesale Santa Fe - Supermercado. Parque La Mexicana.	Av. Tamaulipas Av. Santa Fe 128 Contadero, Cuajimalpa de Morelos 05348 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	13,136.60	2022	4.8178	3.25E-03
16	Cuajimalpa de Morelos	Skatepark (PLM). Costco Wholesale Santa Fe - Supermercado	Av. Tamaulipas Av. Santa Fe 128 Contadero, Cuajimalpa de Morelos	Semi - intensivo	1,781.50	2022	4.7846	3.23E-03
17	Cuajimalpa de Morelos	IEMS Plantel Cuajimalpa	Carretera Federal México Toluca Km 19.8, Col. El Molinito Del. Cuajimalpa. C.P.05310	Extensivo	2,537.10	2016	19.612	1.32E-02

18	Cuajimalpa de Morelos	Ibero Santa Fe. Estacionamiento 7	Santa Fe, Zedec Sta. Fe alvaro Obregón, 01376 CDMX	Intensivo	1,350.00	2018	14.388	9.71E-03
19	Cuauhtémoc	Oficinas Centrales del Sistema Colectivo Metro	Delicias 67, Colonia Centro, Centro, Cuauhtémoc, 06000 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	1,189.56	2007	44.9939	3.04E-02
20	Cuauhtémoc	Oficinas Recuver	Jose Azueta 32, Colonia Centro, Centro, Cuauhtémoc, 06000 Centro, CDMX	Semi - intensivo	90.51	2009	39.744	2.68E-02
21	Cuauhtémoc	Estación del STC Metro	Glorieta de Insurgentes, Cuauhtémoc, 06600 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	717.1	2007	45.0483	3.04E-02
22	Cuauhtémoc	Fiscalía General de la República (FGR)	GLORIETA. Av. Insurgentes Sur #20, Roma Nte. Cuauhtémoc, 50360 Ciudad de México, CDMX	Semi - intensivo	403.23	2016	21.2456	1.43E-02
23	Cuauhtémoc	Reforma 222 - Centro comercial	Av. P.º de la Reforma 222, Juárez, Cuauhtémoc, 06600	Intensivo	2,451.29	2008	43.0272	2.90E-02
24	Cuauhtémoc	Corporativo HSBC. Banco	Av. P.º de la Reforma 347, Cuauhtémoc 6500	Intensivo	428	2007	45.0551	3.04E-02
25	Cuauhtémoc	El Mayor - Restaurante mexicano	República de Argentina 15, Centro Histórico de la Cdad. de México, Centro, Cuauhtémoc 6020	Semi - intensivo	158.36	2008	41.4112	2.79E-02
26	Gustavo A. Madero	IEMS Plantel GAM I	Av. La Corona 436. Col. Loma de la Palma Del. Gustavo A. Madero. C.P.07160	Intensivo	1,307.55	2016	20.0512	1.35E-02
27	Gustavo A. Madero	Hospital Pediátrico La Villa	Av. Hidalgo S/n & Av. Cantera, Esq, Estanzuela, Villa Gustavo A Madero, Ciudad de México, CDMX	Extensivo	240.18	2015	24.0381	1.62E-02
28	Gustavo A. Madero	Hospital Materno Infantil Cuauhtémoc	Av. Emiliano Zapata 700, Cuauhtémoc de Madero, Gustavo A. Madero, 85800 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	306	2015	22.8816	1.54E-02
29	Gustavo A. Madero	TV1-CIEMAD	30 de junio de 1520 s/n La Laguna Ticomán Gustavo A. Madero 07340	Extensivo	8.22	2019	12.3325	8.32E-03

30	Gustavo A. Madero	TV2-CIEMAD	30 de junio de 1520 s/n La Laguna Ticomán Gustavo A. Madero 07340	Extensivo	6	2022	2.8598	1.93E-03
31	Gustavo A. Madero	Hospital General La Villa	Calz. San Juan de Aragón 285 Granjas Modernas Gustavo A. Madero 07460 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	1,017.00	2015	23.6808	1.60E-02
32	Iztacalco	IEMS Plantel Iztaalco	Calle Oriente 237 21, Col. Agrícola Oriental Del. Iztaalco. C.P.08500	Intensivo	700.41	2009	39.8325	2.69E-02
33	Iztacalco	Colegio privado	C. Vainilla 9-A, Ex-Ejido de la Magdalena Mixhuca, Iztaalco	Extensivo	140	2010	37.1798	2.51E-02
34	Iztapalapa	Plaza Central Iztaalapa	Canal Rio Churubusco 1635, área Federal Central de Abastos, Iztaalapa, CP: 09040 Iztaalapa, CDMX	Extensivo	3,000.00	2009	38.922	2.63E-02
35	Iztapalapa	Hospital de Especialidades Dr. Belisario Domínguez	Av. Tláhuac 4866, San Lorenzo Tezonco, Iztaalapa, 09930 Ciudad de México, CDMX	Intensivo	2,226.00	2008	41.84	2.82E-02
36	Iztapalapa	Clínica-Hospital Emiliano Zapata	Calle Cuco Sánchez Mz. 143 Int.1 Esq. Pedro Infante Colonia Ampliación Emiliano Zapata, CP 09638, Alcaldía Iztaalapa, Ciudad de México.	Extensivo	1,200.00	2015	23.8779	1.61E-02
37	Iztapalapa	IEMS Plantel Iztaalapa II	Calle Zacatlán esq. Cempasúchil S/N, Col. Pueblo San Lorenzo Del. Iztaalapa. C.P.09790	Extensivo	426.46	2012	31.884	2.15E-02
38	Iztapalapa	Hospital Pediátrico Iztaalapa	Ermida Iztaalapa 780, Granjas San Antonio, Iztaalapa, 09070 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	1,100.00	2015	23.3856	1.58E-02
39	Iztapalapa	UACM Plantel Casa Libertad - Universidad pública	Ermida Iztaalapa 4163, Lomas de Zaragoza, Iztaalapa 9620	Extensivo	1,796.47	2001	61.1271	4.13E-02
40	Iztapalapa	Centro de Cultura Ambiental Yautica PILARES	Av. de las Torres Sn Amp Emiliano Zapata Iztaalapa 09637	Extensivo	1,500.00	2008	43.1504	2.91E-02

41	La Magdalena Contreras	Cendi Gdf (La Magdalena) - Escuela	10580 de C. J. Moreno Salido 105BIS La Magdalena, La Magdalena Contreras 10910	Extensivo	69.1	2008	41.5312	2.80E-02
42	Miguel Hidalgo	Walmart Express Horacio	Av. Horacio 603, Polanco, Polanco V Secc, Miguel Hidalgo, 11560 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	300	2009	39.714	2.68E-02
43	Miguel Hidalgo	IEMS Plantel Miguel Hidalgo	Lago Ximilpa 88, Col. Argentina Antigua Del. Miguel Hidalgo. C.P.11270	Extensivo	346.05	2009	39.981	2.70E-02
44	Miguel Hidalgo	Museo de Historia Natural y Cultura Ambiental	Av. de los Compositores, Bosque de Chapultepec II Secc, Miguel Hidalgo, 11100 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	317.56	2009	40.023	2.70E-02
45	Miguel Hidalgo	Miyana. Centro Comercial	Av. Ejercito Nacional Mexicano 769, Granada, Miguel Hidalgo, 11520 Ciudad de México, CDMX	Semi - intensivo	5,849.05	2016	21.1576	1.43E-02
46	Miguel Hidalgo	Hospital General Dr. Rubén Leñero	Calle Salvador Diaz Mirón 344, Un Hogar Para Nosotros, Miguel Hidalgo 11340 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	1,681.00	2016	21.1264	1.43E-02
47	Miguel Hidalgo	Museo Nacional de Historia. Castillo de Chapultepec	Bosque de Chapultepec I Secc Miguel Hidalgo 11580	Intensivo	962.32	1944	-	-
48	Miguel Hidalgo	Papalote Museo del Niño	Av. Constituyentes 268 Bosque de Chapultepec II Secc Miguel Hidalgo 11100 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	1294.01	2017	21.2888	1.44E-02
49	Milpa Alta	Hospital General Milpa Alta	Blvd. Jose López Portillo 386, Santa Cruz, Milpa Alta 12000 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	1,185.00	2016	26.077	1.76E-02
50	Tláhuac	Hospital General Tláhuac	Avenida La Turba #655 esq. Gabriela Mistral Colonia Villa Centroamericana, Código postal 13278, Alcaldía Tláhuac, Ciudad de México.	Extensivo	3,583.00	2014	23.9067	1.61E-02

51	Tláhuac	IEMS Plantel Tláhuac	Canal de Chalco s/n esq. Piraña. Col. Del Mar. Alcaldía Tláhuac. C.P. 13270.	Extensivo	1,471.44	2015	29.2248	1.97E-02
52	Tlalpan	Hospital General Ajusco Medio	Encinos 42, Miguel Hidalgo 4ta Secc, Tlalpan, 14250 Ciudad de México, CDMX	Intensivo	891.45	2013	25.71	1.74E-02
53	Tlalpan	IEMS Plantel Tlalpan	Yobain 105, Col. Belverde Del. Tlalpan. C.P.14720	Extensivo	634.91	2014	30.5604	2.06E-02
54	Tlalpan	Hospital Angeles Acoxpa	Calz Acoxpa 430, Coapa, Ex- Hacienda Coapa, Tlalpan, 14308 Ciudad de México, CDMX	Intensivo	366.77	2012	21.1776	1.43E-02
55	Venustiano Carranza	Hospital General Balbuena	Sur 111 S/N, Aeronáutica Militar, Venustiano Carranza, 15970 Ciudad de México, CDMX	Extensivo	2,921.00	2016	26.671	1.80E-02
56	Xochimilco	IEMS Plantel Xochimilco	Carretera Nueva Xochimilco - Tulyehualco 9745. Col. Pueblo Santiago Tulyehualco Del. Xochimilco. C.P.16700	Extensivo	1,291.21	2014	18.6116	1.26E-02

Fuente: Elaboración propia con base en datos de la SEDEMA, (2017) y Google Earth Pro

Tabla A 2. Sitios en zonas prioritarias para colocar techos verdes

Nivel . ID	X	Y	Nombre	Tipo	Superficie (m ²)	Alcaldía	Año construcción
3.1	480559.4	2133505.87	Mercado 257	Mercado	12722	Tlalpan	2015
3.2	483036.96	2139867.16	Mercado 59	Mercado	5044	Coyoacán	+20
3.3	479915.32	2138791.85	Mercado 7	Mercado	4288	Álvaro Obregón	+20
3.4	486826.2	2135996.84	Tiendas de auto servicio 538	Supermercado	20429	Coyoacán	+20
3.5	485786.3	2135381.09	Centro y plaza comercial 522	Centro comercial	8157	Coyoacán	2012
3.6	480339.89	2134706.47	Centro y plaza comercial 531	Centro comercial	7994	Coyoacán	+20
3.7	482201.77	2150776.73	Hospital General Dr. Rubén Leñero	Hospital	6165	Miguel Hidalgo	+20
3.8	485185.64	2122856.12	Hospital Materno Infantil Topilejo	Hospital	2755	Tlalpan	2006-2007
3.9	468350.58	2139349.25	Hospital Bienestar Cuajimalpa	Hospital	3671	Cuajimalpa de Morelos	2022
3.1	474480.07	2138351.66	Grand San Francisco	Centro comercial	1677	Álvaro Obregón	2010-2012
3.11	474808.56	2143114.69	Coppel Vasco de Quiroga	Centro comercial	970	Álvaro Obregón	2004
3.12	472748.02	2141175.67	Park Plaza	Centro comercial	4620	Álvaro Obregón	2012
3.13	485286.89	2132111.75	Super ISSTE México Xochimilco	Supermercado	355	Tlalpan	+20
3.14	487134.67	2129333.1	Chedraui Tepalcatlalpan	Supermercado	7229	Xochimilco	+20
3.15	486844.36	2135985.72	Walmart Miramontes	Supermercado	20429	Coyoacán	+20
3.16	468301.72	2139549.11	Plaza Contadero	Centro comercial	700	Cuajimalpa de Morelos	2003
3.17	471324.18	2140840.9	Centro Santa Fe	Centro comercial	52189	Cuajimalpa de Morelos	+20
3.18	471653.79	2140605.1	City Walk Santa Fe	Centro comercial	1970	Cuajimalpa de Morelos	2008
3.19	469216.72	2140722	Chedraui Cuajimalpa	Supermercado	8407	Cuajimalpa de Morelos	2016
3.2	472379.06	2141422.28	Pasaje Santa Fe	Centro comercial	3012	Álvaro Obregón	+20
4.1	476478.9	2135156.69	Centro y plaza comercial 477	Centro comercial	3172	Tlalpan	+20
4.2	477742.15	2135854.03	Centro y plaza comercial 25	Centro comercial	4780	Álvaro Obregón	2004-2009

4.3	479100.45	2137966.77	Centro y plaza comercial 28	Centro comercial	3090	Álvaro Obregón	+20
4.4	481489.19	2139162.76	Centro y plaza comercial 554	Centro comercial	719	Coyoacán	2004
4.5	482846.57	2139531.29	Tiendas departamentales 494	Centro comercial	797	Coyoacán	+20
4.6	484038.37	2139736.03	Centro y plaza comercial 549	Centro comercial	562	Coyoacán	+20
4.7	482589.85	2144419.98	Tiendas de autoservicio 193	Supermercado	709	Benito Juárez	2001-2004
4.8	483818.87	2145365.56	Centro comercial 169	Centro comercial	24230	Benito Juárez	2005
4.9	483659.01	2146339.56	Centro y plaza comercial 715	Centro comercial	11889	Cuauhtémoc	+20
4.1	481264.25	2156611.79	Centro y plaza comercial 251	Centro comercial	51612	Azcapotzalco	2009
4.11	476312.54	2136037.46	Mercado 208	Mercado	914	La Magdalena Contreras	+20
4.12	477792.81	2143932.84	Mercado 6	Mercado	1160	Álvaro Obregón	+20
4.13	479207.69	2144829.84	Mercado 5	Mercado	2387	Álvaro Obregón	+20
4.14	480165.77	2145406	Mercado 217	Mercado	8420	Miguel Hidalgo	+20
4.15	481683.05	2146348.87	Mercado 101	Mercado	561	Cuauhtémoc	+20
4.16	482381.59	2139079.93	Hospital Pediátrico Coyoacán	Hospital	3335	Coyoacán	+20
4.17	468338.63	2139357.44	Hospital Materno Infantil Cuajimalpa	Hospital	3671	Cuajimalpa de Morelos	2022
4.18	490266.81	2151525.29	Hospital Pediátrico San Juan de Aragón	Hospital	3166	Gustavo A. Madero	+15
4.19	478667.49	2155958.41	Hospital Materno Infantil Dr. Nicolás M. Cedillo	Hospital	4975	Azcapotzalco	2007
4.2	478639.28	2150691.07	Hospital Pediátrico Legaria	Hospital	4679	Miguel Hidalgo	+20
5.1	497072.33	2138827.98	Hospital General Iztapalapa C.E.E.	Hospital	11137	Iztapalapa	+20
5.2	482936.8	2140660.18	Hospital General Xoco	Hospital	9234	Benito Juárez	+20
5.3	479963.64	2145370.24	Hospital Pediátrico Tacubaya	Hospital	1301	Miguel Hidalgo	2001-2004

5.4	480532.85	2154444.35	Hospital Azcapotzalco	Pediátrico	Hospital	3586	Azcapotzalco	+15
5.5	485545.47	2157763.96	Hospital Ticomán	General	Hospital	3629	Gustavo A. Madero	+15
5.6	480538.47	2154270.81	Mercado Azcapotzalco		Mercado	8554	Azcapotzalco	+15
5.7	482122.44	2149549.52	Mercado 212		Mercado	4045	Miguel Hidalgo	+20
5.8	485370.88	2145867.8	Mercado 90		Mercado	2242	Cuauhtémoc	+20
5.9	486521.68	2146470.97	Mercado 105		Mercado	853	Cuauhtémoc	+20
5.1	489401	2146819.95	Mercado 290		Mercado	2072	Venustiano Carranza	+20
5.11	483576.75	2156555.13	Plaza 322		Centro comercial	4969	Gustavo A. Madero	+15
5.12	482927.69	2142143	Pabellón 182		Centro comercial	12749	Benito Juárez	2008
5.13	479637.98	2144338.5	Plaza 59		Centro comercial	305	Álvaro Obregón	+20
5.14	489956.61	2153911.49	Plaza 331		Centro comercial	15920	Gustavo A. Madero	2002-2005
5.15	481723.32	2144450.35	Plaza 197		Centro comercial	7210	Benito Juárez	2001
5.16	486051.71	2155233.72	Suburbia 319		Centro comercial	2211	Gustavo A. Madero	+15
5.17	479973.9	2143671.11	Costco 21		Supermercado	9654	Álvaro Obregón	+20
5.18	483502.02	2133464.17	Soriana 481		Supermercado	6436	Tlalpan	2006
5.19	482192.65	2142764.34	Citymarket 192		Supermercado	3026	Benito Juárez	2008
5.2	481947.5	2138998	La Comer 497		Supermercado	11386	Coyoacán	+20

A1. Guión de entrevista semi estructurada.

0. Presentar y explicar el objetivo del proyecto, mencionar que no se lleva más de 10 min la entrevista

Responsables

1. Me podría platicar ¿cómo fue que decidieron instalar el techo verde (tv) en este edificio?
2. ¿Brevemente podría platicarme desde cuánto tiempo ha trabajado aquí o en techos verdes?
3. ¿Me podría decir qué cuidados implica para usted/es tener un tv?
4. Considerando lo comentado anteriormente sobre los cuidados, (problemas o ventajas), me podría mencionar al menos 3 razones por las cuales usted considera mantener el techo verde
5. Además de lo mencionado, ¿conoce alguno de los beneficios ambientales que provee el techo verde?
 - a. Entonces, considerando lo platicado, ¿me podría sintetizar algunos aspectos positivos y negativos?
6. A usted personalmente, ¿qué emociones le provocan ver/convivir en el espacio de tv?
7. Concluyendo, considerando su experiencia, usted ¿Recomendaría que se expanda el uso de los techos verdes en la CDMX?
 - a. sí/no, ¿me podría mencionar algunos argumentos para apoyar su recomendación?

Usuarios

1. ¿Qué tan frecuentemente visita este espacio?
2. ¿Me podría platicar qué es para usted un techo verde?
 - a. si no hacen alusión al tv del inmueble: ¿usted considera que su edificio tiene un tv? / ¿usted sabía que en este edificio hay un tv?
3. ¿Me podría mencionar algunos beneficios ambientales que aporta el techo verde?
4. Además de beneficios ambientales, ¿Considera que el techo verde hace que su edificio sea especial/ distinto/ diferente/ destaque?
5. ¿Qué emociones le provoca ver el tv?
 - a. si aparecen solo negativa o negativas, según la respuesta: Me ha comentado emociones positivas/negativas, ¿no siente alguna emoción positiva/negativa: sí/no?, ¿cuáles?
6. Considerando lo que me ha platicado, ¿Usted recomendaría que se expanda el uso de los techos verdes en la CDMX?
 - a. sí/no, ¿me podría mencionar algunos argumentos para apoyar su recomendación?

ANEXO 2

