

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN GESTIÓN DE RIESGOS Y
CAMBIO CLIMÁTICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PARTICIPACIÓN EN PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:
ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN
PARA LA ISLA DE CALOR EN TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS.

PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADA EN CIENCIAS DE
LA TIERRA

PRESENTA:

SAHIAN ARELI PÉREZ CASTILLO.

DIRECTOR:

DR. WILLIAMS VÁZQUEZ MORALES.

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS. A AGOSTO DEL 2024.





Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas
Dirección de Servicios Escolares
Departamento de Certificación Escolar
Autorización de impresión



Lugar: TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS
Fecha: AGOSTO 12, 2024

C. **Sahian Areli Pérez Castillo**

Pasante del Programa Educativo de: LICENCIATURA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

Análisis Costo – Beneficio de las Medidas de Mitigación Para la isla de Calor Urbano.

En la modalidad de: Participación En Un Proyecto De Investigación

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Dr. Emmanuel Díaz Nigenda

Dra. Andrea Venegas Sandoval

Dr. Williams Vázquez Morales

INSTITUTO DE INVESTIGACION
EN GESTIÓN DE RIESGOS
Y CAMBIO CLIMÁTICO



LICENCIATURA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
COORDINACIÓN DE TITULACIÓN

Firmas:

Índice

I.	Introducción	1
II.	Planteamiento del Problema	3
III.	Objetivos del Proyecto	4
	III.1. Objetivo General	4
	III.2. Objetivos Específicos	4
IV.	Importancia y Limitaciones del Estudio	5
	IV.1. Datos locales limitados	5
	IV.2. Variabilidad en los costos	6
V.	Metodología	8
	V.1. Selección de Medidas de Mitigación Aplicables	8
	V.1.1. Estimación de Costos de Implementación	8
	V.1.2. Beneficios ambientales	9
	V.2. Construcción de la Matriz CB	10
	V.2.1. Selección de Valores para Construir la Matriz	10
	V.2.2. Desarrollo y análisis de la Matriz CB	10
VI.	Resultados	13
	VI.1. Selección de los Sistemas de Mitigación Para la ICU en Tuxtla Gutiérrez	13
	VI.1.1. Implicaciones Económicas	14
	VI.1.1.1. Instalación de un techo verde (TV).	14
	Selección de especies para un TV.	15
	Instalación de los sistemas de cubiertas verdes.	19
	VI.1.1.2. Instalación de sistemas de cubiertas claras.	20
	VI.1.1.3. Instalación de sistemas de muros verdes.	22

VI.1.1.4. Instalación de arbolado urbano.	22
Propuesta de especies vegetales a utilizar en la zona de estudio.	23
VI.1.1.5. Análisis de los Costos de Instalación por m2 de las Medidas de Mitigación para la ICU.	27
VI.1.2. Análisis de los Beneficios	30
VI.1.2.1. Servicios ecosistémicos.	30
Calidad del aire.	30
Captación de agua de lluvia.	33
Aumento de la diversidad de especies.	35
VI.1.2.2. Beneficios privados.	36
Reducción de la temperatura.	36
Reducción en costos de energía.	39
Reducción del ruido.	41
Incentivos económicos en políticas públicas en México.	42
VI.2. Matriz Costo-Beneficio	44
VI.2.1. Análisis de los Servicios ecosistémicos	48
VI.2.1.1. Calidad del aire.	48
VI.2.1.2. Captación de agua de lluvia.	50
VI.2.2. Análisis de los Beneficios Privados	50
VI.2.2.1. Reducción de la temperatura.	50
VI.2.2.2. Reducción de costos de energía eléctrica.	52
VI.2.2.3. Reducción del ruido.	53
VI.2.2.4. Incentivos económicos por políticas públicas.	54

VII.	Conclusiones	55
VIII.	Anexos	59
	<i>Anexo 1</i> Tabla de estimación presupuestaria inicial para la implementación de un Techo Verde Extensivo por m ² .	59
	<i>Anexo 2</i> Tabla de estimación presupuestaria inicial para la implementación de un Techo Claro con membrana prefabricada sobre un techo por m ² .	60
	<i>Anexo 3</i> Tabla de estimación presupuestaria inicial para la instalación de un árbol.	61
IX.	Referencias Bibliográficas	62

Índice de Tablas

Tabla 1 Comparativa de Características Físicas y Vegetales para Techos Verdes Extensivos e Intensivos	17
Tabla 2 Grupos de plantas recomendadas para techos verdes extensivos en función de su espesor y accesibilidad.	18
Tabla 3 Características de la implementación de un techo claro (TC) según los materiales utilizados.	21
Tabla 4 Especies vegetales nativas recomendadas para la región de Tuxtla Gutiérrez.	25
Tabla 5 Costos finales asociados al proceso de instalación de medidas de mitigación para la ICU por m^2 .	27
Tabla 6 Rangos de costos mínimos y máximos para la implementación de sistemas de mitigación para la ICU, según la literatura revisada.	29
Tabla 7 Datos sobre la Captura de Contaminantes por Medida de Mitigación para la ICU.	32
Tabla 8. Porcentaje de Captación de Agua de Lluvia por Medidas de Mitigación para la Infraestructura de Control Urbano (ICU): Recopilación de Estudios.	35
Tabla 9. Presencia de diversidad de especies en los sistemas de mitigación para la ICU.	36
Tabla 10. Evidencia Bibliográfica sobre la Reducción de la Temperatura en ICU mediante Sistemas de Mitigación.	37
Tabla 11 Porcentaje de Reducción de Costos Energéticos Mediante Sistemas de Mitigación para la ICU.	40
Tabla 12 Desempeño de Sistemas de Mitigación Para la ICU en la Reducción de Ruido: Datos Recopilados de Estudios Previos.	42
Tabla 13 Matriz Costo-Beneficio de las Medidas de Mitigación para la Isla de Calor Urbana.	45

I. Introducción

Los cambios en el clima registrados en las últimas décadas y los proyectados a futuro son un tema de gran importancia para todas las sociedades, ya que sus efectos pueden afectar la salud, la economía y el ecosistema. Según el Informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2018), el incremento de las temperaturas globales es innegable y se espera que continúe en las próximas décadas. Esto ha llevado a un aumento en los eventos climáticos extremos, como olas de calor, sequías e inundaciones, que tienen un impacto significativo en las áreas urbanas.

En la actualidad, más de la mitad de la población mundial se concentra en áreas urbanas y se espera que para el año 2050, aproximadamente 2,500 millones de personas vivan en ciudades (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [UNDP por sus siglas en inglés], 2011). Este rápido crecimiento urbano plantea desafíos adicionales, especialmente en términos de la Isla de Calor Urbano (ICU). La ICU se refiere al fenómeno en el cual las áreas urbanas experimentan temperaturas más altas que las áreas rurales circundantes debido a la absorción y retención de calor por parte de los materiales de construcción y la falta de vegetación (Oke, 1982). Esto tiene consecuencias negativas para la salud de los habitantes urbanos, el consumo de energía y el medio ambiente.

En Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, una ciudad en rápido crecimiento, la ICU se ha convertido en un problema cada vez más acuciante debido a la expansión urbana descontrolada, la escasez de áreas verdes y la alta densidad de edificios. De acuerdo con Zavaleta-Palacios et al. (2020), se ha identificado la presencia de la ICU en diferentes momentos del día, con intensidades que oscilan entre 0.5 y 2.5 °C. Además, este estudio enfatiza la importancia de conservar áreas verdes en la planificación urbana para mitigar los efectos de la ICU. Por su parte Castro-Mendoza et al. (2022)

destaca la convergencia de factores naturales, como las latitudes tropicales, y factores antropogénicos, tal es el caso del Cambio Climático y la Isla de Calor Urbana, como impulsores del fuerte aumento de la temperatura en la región. Este enfoque se centra en analizar la relación entre el cambio de uso de suelo y la temperatura de superficie (TS) para comprender mejor su repercusión en la Isla de Calor Urbana de Tuxtla Gutiérrez. Los resultados revelan un incremento del 18% en la frecuencia de temperaturas superiores a 40 °C desde 1980, con un 14% adicional en temperaturas nocturnas superiores a 28 °C.

En el contexto específico de Tuxtla Gutiérrez, se señala que el cambio de cubierta arbórea a carretera asfaltada genera un aumento significativo de 1 °C a 3 °C en la Temperatura de Superficie (LST). Además, se destaca el impacto refrescante de la reforestación, evidenciado por una reducción de 0,1 °C a 1 °C en el LST al cambiar de asfalto a la categoría de árbol (Castro-Mendoza et al., 2022). La investigación enfatiza la relevancia de examinar la dinámica térmica superficial en entornos urbanos, especialmente frente al proyectado aumento del 60% de la población mundial en ciudades para el año 2030. Ante este escenario, es crucial implementar medidas de mitigación para reducir los efectos de la ICU en Tuxtla Gutiérrez, entre ellas está la implementación de techos verdes, los techos claros, muros verdes y arbolado urbano. Estas medidas no solo ayudan a reducir la temperatura en las áreas urbanas, sino que también tienen beneficios adicionales, como la mejora de la calidad del aire, la reducción del ruido y la promoción de la biodiversidad (Berardi, 2015).

En este trabajo, se llevó a cabo un análisis costo-beneficio de estas medidas de mitigación para la ICU en Tuxtla Gutiérrez. Se evaluaron tanto los beneficios públicos como los beneficios privados de la implementación de estas medidas, considerando los costos asociados. Además, se examinó la relación entre los atributos ambientales y los sistemas de mitigación, con el fin de identificar las medidas más efectivas y económicas para abordar este fenómeno en la ciudad.

II. Planteamiento del Problema

La ICU es un fenómeno que se ha vuelto cada vez más preocupante en las áreas urbanas debido al rápido crecimiento urbano y la falta de áreas verdes en las ciudades. Tuxtla Gutiérrez, la capital del estado de Chiapas, no es una excepción a este problema.

Este aumento de las temperaturas tiene consecuencias negativas para la salud de los habitantes urbanos, el consumo de energía y el medio ambiente. Por un lado, las altas temperaturas pueden aumentar el riesgo de enfermedades relacionadas con el calor y afectar la calidad de vida de los residentes (Basu, 2009). Por otro lado, el mayor uso de sistemas de enfriamiento, como el aire acondicionado, para contrarrestar las altas temperaturas, conlleva un aumento en el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero (Akbari et al., 2001).

Ante este escenario, es importante implementar medidas de mitigación para reducir los efectos de la ICU en Tuxtla Gutiérrez. Sin embargo, la implementación de estas medidas implica costos económicos, y es necesario evaluar si los beneficios obtenidos justifican dichos costos. Por ende, se propuso la necesidad de llevar a cabo un análisis costo-beneficio (CB) de estas medidas, abarcando tanto los beneficios públicos como los privados de su implementación, así como la relación entre los atributos ambientales y los sistemas de mitigación, con el fin de identificar las medidas más efectivas y económicas para abordar este fenómeno en la ciudad.

Este análisis CB ofrece datos valiosos para los actores clave, incluyendo urbanistas y planificadores urbanos, posibilitando la toma de decisiones fundamentadas acerca de la aplicación de medidas de mitigación de la ICU en Tuxtla Gutiérrez. Además de enriquecer el entendimiento científico sobre la relevancia de abordar esta problemática en entornos urbanos y establecer un fundamento para investigaciones venideras en el ámbito de la mitigación de la ICU (McDonnell et al., 2009).

III. Objetivos del Proyecto

III.1. Objetivo General

Evaluar mediante el criterio costo-beneficio diversas medidas de mitigación de la isla de calor que se presenta en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

III.2. Objetivos Específicos

- Identificar medidas de mitigación posibles a aplicarse en viviendas de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Estimar costos por implementación de cada medida de mitigación.
- Analizar los beneficios ambientales generados en la implementación de las estrategias de mitigación para las islas de calor.
- Seleccionar bajo los criterios mencionados la estrategia más adecuada que podrían implementar los habitantes de la zona de estudio.

IV. Importancia y Limitaciones del Estudio

Este estudio representa una contribución significativa al campo de la mitigación de la isla de calor urbano, especialmente en el contexto de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. La construcción de la matriz de Costo-Beneficio (CB) detallada ofrece una herramienta valiosa para los responsables de la toma de decisiones, urbanistas y planificadores, ya que proporciona una visión clara y objetiva de las opciones disponibles para reducir los efectos del calor urbano en la ciudad.

La matriz CB, al plasmar los valores económicos asociados con cada sistema de mitigación evaluado, facilita el análisis y la comparación de alternativas de manera efectiva. Permitiendo identificar las opciones más asequibles y factibles, teniendo en cuenta tanto los aspectos económicos como los beneficios ambientales. Esta herramienta se vuelve especialmente relevante para las autoridades locales y los inversionistas, quienes deben tomar decisiones informadas y fundamentadas en la implementación de políticas públicas y proyectos urbanos sostenibles (Zavaleta-Palacios et al., 2020).

Además, la inclusión de una codificación visual en la matriz CB, resaltando en color verde aquellos sistemas con costos más bajos, facilita la identificación de opciones más económicas y simples de implementar. Esta representación gráfica es de gran utilidad para la comunicación de resultados y la toma rápida de decisiones en la gestión urbana.

Sin embargo, se presenta algunas limitaciones que es importante considerar al interpretar los resultados y aplicar las conclusiones en la realidad como:

IV.1. Datos locales limitados

La falta de datos disponibles en el contexto mexicano para ciertos sistemas de techos y muros verdes puede afectar la precisión de los valores estimados en la matriz CB. La extrapolación de

datos de otros países puede ser útil, pero también puede generar incertidumbre en la viabilidad económica y ambiental de ciertas medidas de mitigación.

Es importante destacar que la falta de información y conocimiento de las medidas de mitigación para la ICU en Tuxtla Gutiérrez representa una barrera significativa en su implementación. El desconocimiento puede llevar a la población a subestimar o ignorar la importancia y los beneficios de estas medidas, lo que podría resultar en una resistencia a su adopción.

La falta de divulgación adecuada y educación sobre estas estrategias puede generar una brecha entre las soluciones disponibles y su aplicación práctica. Sin un conocimiento claro de cómo estas medidas pueden contribuir a mejorar la calidad del entorno urbano y el bienestar de la población, es menos probable que la comunidad las incorpore en su día a día.

IV.2. Variabilidad en los costos

Los costos para cada sistema de mitigación, son variables debido a que están sujetos a factores como el lugar de la implementación, el precio del dólar o euro, envío dentro del territorio, ya que no todos los materiales son posibles de encontrar en el municipio, el costo por mano de obra vigentes entre otras. Esto implica que los valores económicos pueden cambiar con el tiempo y en diferentes áreas de la ciudad, lo que requiere una constante actualización y adaptación de las estimaciones para una toma de decisiones informada. Además, es importante mencionar que la cotización utilizada proviene de una empresa que no pertenece a la región, lo que puede afectar la precisión de los costos estimados.

A pesar de estas limitaciones, este estudio proporciona una base sólida para la comprensión de las opciones de mitigación de la ICU en Tuxtla Gutiérrez y ofrece una guía útil para la planificación y diseño de proyectos urbanos sostenibles. Es importante reconocer estas limitaciones y utilizar

los resultados con prudencia, considerando la necesidad de continuar investigando y adaptando las estrategias para lograr una ciudad más resiliente y amigable con el medio ambiente.

El estudio también destaca la relevancia de políticas públicas que incentiven la adopción de sistemas de techos y muros verdes en la ciudad. La promoción de programas de sustentabilidad ambiental y desarrollo urbano, como el Programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA) y el descuento en el pago de predial para áreas verdes, puede ser una estrategia efectiva para fomentar la implementación de estas soluciones sostenibles.

En términos de impacto social y ambiental, este estudio proporciona información valiosa para la mejora del bienestar de los habitantes de Tuxtla Gutiérrez. La reducción de las temperaturas y la mejora de la calidad del aire pueden contribuir a prevenir enfermedades relacionadas con el calor y mejorar la calidad de vida de la población (World Health Organization [WHO], 2022). Asimismo, la implementación exitosa de sistemas de techos y muros verdes puede promover una mayor interacción con la naturaleza, ofreciendo espacios verdes para el esparcimiento y la convivencia social, lo que favorece el sentido de comunidad y bienestar emocional.

V. Metodología

La estrategia metodológica para elaborar la matriz de Costo-Beneficio (CB) de las medidas de mitigación para la ICU en Tuxtla Gutiérrez, se estructuró en dos procesos, el primero es seleccionar las medidas de mitigación y el segundo en construir la matriz CB donde se evalúan las medidas de mitigación propuestas.

V.1. Selección de Medidas de Mitigación Aplicables

Se realizó una evaluación para seleccionar las medidas de mitigación aplicables y viables con la intención de elegir las medidas a analizar para la población de Tuxtla Gutiérrez. El proceso de selección se llevó a cabo de manera meticulosa y centrada en las necesidades de la población local, con el objetivo de garantizar que las soluciones propuestas sean efectivas, asequibles y sostenibles a largo plazo para todos los habitantes de la ciudad. Para ello, se consideraron factores como viabilidad económica para la población y capacidad del sistema para reducir el impacto de la ICU. Este análisis se basó en una revisión bibliográfica exhaustiva, enfocada en conocer las medidas de mitigación de la ICU, centrándose en estudios previos relevantes a nivel local, nacional e internacional. El proceso implicaba la exploración de diversos reservorios de información, entre los cuales destacan plataformas como Redalyc, Scielo, Google Académico, entre otros recursos académicos y científicos. Así como el uso de documentos relevantes que referenciaran a otros estudios que permitan enriquecer la cantidad de datos a evaluar.

V.1.1. Estimación de Costos de Implementación

Para estimar los costos de instalación de las medidas de mitigación, se emplearon datos de fuentes externas y literatura especializada en el campo de la construcción sostenible y la mitigación de la ICU.

Para obtener una estimación precisa y realista de los costos de implementación, se solicitó asesoramiento de diversas empresas dentro del territorio mexicano. Para este estudio la empresa PRODICON (Proyecto, Diseño y Construcción), que es una empresa especializada en proyectos de construcción sostenible y diseño arquitectónico oaxaqueña, brindó el acompañamiento en el desarrollo de presupuestos adaptados a las necesidades y características del presente estudio.

El proceso de estimación de costos se realizó con un enfoque integral, teniendo en cuenta no solo los costos directos de instalación de las medidas de mitigación, sino también los costos indirectos asociados con la mano de obra, los materiales, el mantenimiento y cualquier otro gasto relacionado.

V.1.2. Beneficios ambientales

Se definieron los beneficios ambientales y privados que fueron objeto de análisis para cada medida de mitigación seleccionada. Este proceso implicó identificar los impactos positivos que cada medida puede tener en el entorno urbano y en la calidad de vida de los habitantes de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Para ello se consideraron dos aspectos a evaluar:

Beneficios privados: Esta categoría abordó los beneficios que las medidas de mitigación pueden proporcionar a nivel individual, centrándose en aspectos relacionados con la calidad de vida y el bienestar de los habitantes. Los beneficios analizados incluyeron; reducción de temperatura, reducción en costos de energía eléctrica, reducción del ruido e incentivos por políticas públicas.

Servicios ecosistémicos: Esta categoría incluyó los beneficios ambientales que las medidas de mitigación pueden proporcionar a nivel de ecosistema y medio ambiente en general; se abordaron

los siguientes aspectos; calidad del aire, captación de agua de lluvia y aumento en la diversidad de especies.

Esta división permitió una evaluación más completa y detallada de los beneficios asociados con cada medida de mitigación, lo que facilitó la toma de decisiones informadas y la selección de las estrategias más adecuadas para abordar el problema de la ICU en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

V.2. Construcción de la Matriz CB

V.2.1. Selección de Valores para Construir la Matriz

Se seleccionaron los valores correspondientes a los costos de implementación, los servicios ecosistémicos y beneficios privados, los cuales fueron esenciales para la construcción de la matriz costo-beneficio (CB). Este procedimiento implicó un análisis detallado, donde se evaluaron diferentes alternativas disponibles en la literatura científica y en datos provenientes de fuentes confiables.

Durante este proceso, se priorizó la identificación de aquellos valores que no solo fueran precisos y confiables, sino también aquellos que presentaran el mayor potencial de beneficio en cada uno de los atributos analizados.

V.2.2. Desarrollo y análisis de la Matriz CB

El análisis de la matriz se determinó con base a la metodología de Análisis CB, que es un procedimiento que se utiliza para comparar posibles decisiones sobre alternativas o acciones de inversión, en función a los beneficios sociales netos que se puedan obtener. El término 'beneficio social neto' se refiere a la diferencia entre beneficios y costos sociales, el primero menos el segundo. Un Análisis CB, en la economía moderna del bienestar, puede verse como un intento de

mejorar la calidad de la toma de decisiones y los impactos sociales, así como de aumentar la eficiencia económica del uso de recursos (Gilpin, 2003).

Para esta etapa del análisis, se diseñó cuidadosamente la matriz utilizando los datos seleccionados previamente. Cada sistema mitigatorio y atributo se presentó de manera clara y estructurada, permitiendo una comparación efectiva entre las diferentes opciones. Se aplicó una codificación de colores intuitiva para resaltar visualmente las fortalezas y debilidades de cada medida de mitigación en relación con los distintos atributos. Además, se utilizaron abreviaturas y símbolos para simplificar la presentación de datos complejos y facilitar su rápida y precisa interpretación. Este sistema se basó en diversas opciones, como:

- "N/D" (no disponible),
- "N/A" (no aplicable),
- "S/C" (sin información),

empleadas cuando la información precisa no estaba disponible, pero se reconocía que la condición se cumplía o existía.

Por otro lado, se utilizaron casillas coloreadas en verde, las cuales destacaban los valores óptimos encontrados; mientras que las rojas, señalaban aquellos con menor beneficio. Asimismo, las casillas amarillas indicaban la falta de datos precisos, pero que eran aplicables al sistema correspondiente. Por último, las casillas blancas contenían información pertinente que no encajaba en ninguna de las categorías anteriores, ofreciendo una presentación detallada y comprensible de los datos analizados.

Esta representación visual no solo facilitó la identificación de las opciones más favorables en función de los diversos aspectos analizados, sino que también permitió visualizar aquellos elementos que podrían ser objeto de futuras investigaciones. Este enfoque proporcionó información valiosa para la toma de decisiones informadas al ofrecer una comprensión profunda de cómo cada medida de mitigación podría contribuir a abordar la problemática de la ICU en Tuxtla Gutiérrez. En última instancia, la matriz costo-beneficio se erigió como una herramienta poderosa para evaluar y comparar sistemáticamente las diferentes alternativas de manera objetiva, lo que respaldó la formulación de recomendaciones fundamentadas y efectivas para mejorar la calidad de vida en la comunidad y promover la sostenibilidad ambiental.

VI. Resultados

VI.1. Selección de los Sistemas de Mitigación Para la ICU en Tuxtla Gutiérrez

El proceso de selección se basó en los costos de implementación accesibles para un hogar promedio como lo es una Casa Infonavit con una construcción de entre 50 y 70, es decir, no se consideraron obras públicas como los pavimentos claros ya que estas obras competen al gobierno local y, por ende, no son costeables para el resto de la población.

Dentro del abanico de posibilidades, se destacan cuatro sistemas de mitigación. En primer lugar, se encuentran los techos verdes, tanto extensivos como intensivos, mismos que han demostrado ser una solución eficaz para mitigar las islas de calor urbano. De acuerdo con Adriana de la Cruz-Uribe et al. (2023), estos sistemas pueden disminuir la temperatura de las superficies urbanas hasta en 10° C, impactando significativamente en la comodidad térmica de los residentes.

En segundo lugar, se destacan los muros verdes como una alternativa viable. Un estudio llevado a cabo por Wong et al. (2018) analizó su impacto en la disminución de la temperatura en entornos tropicales. Los resultados revelaron que estos muros pueden reducir la temperatura en un margen de 1 a 3°C durante el día y de 2 a 4°C durante la noche.

En tercer lugar, se encuentran los techos claros con recubrimientos aplicados y membranas asfálticas, los cuales son una opción rentable y eficaz para reducir el calor urbano. Según Lucero-Álvarez (2014), estos sistemas pueden reflejar hasta el 80% de la radiación solar, lo que puede ayudar a disminuir la temperatura de las superficies urbanas y mejorar la eficiencia energética de los edificios.

Finalmente, el arbolado urbano ha sido considerado como una solución efectiva para mitigar las islas de calor urbano. Al respecto, Martínez-Trinidad et al. (2021) han descrito que los árboles

urbanos pueden reducir la temperatura del aire hasta en 2° C y proporcionar beneficios adicionales como la mejora de la calidad del aire y la reducción del ruido.

VI.1.1. Implicaciones Económicas

VI.1.1.1. Instalación de un techo verde (TV). Esta sección del estudio se centra en la fase de instalación de techos verdes (TV) como parte esencial del diseño de edificaciones sostenibles. Su propósito es analizar y seleccionar el sistema de techo verde más adecuado, teniendo en cuenta los requisitos mínimos establecidos en el presente documento.

Para llevar a cabo esta evaluación, se ha realizado un análisis exhaustivo utilizando información proporcionada por una empresa especializada en techos verdes extensivos e intensivos. Esta recopilación de datos ha permitido obtener valores de construcción mínimos y máximos para cubrir todos los costos involucrados en la implementación del sistema.

La metodología empleada incluye la coordinación de información de diversas disciplinas, lo que permitió validar las decisiones técnicas y garantizar el correcto funcionamiento del sistema de techo verde bajo las condiciones ambientales específicas y las características particulares de la edificación o infraestructura a intervenir. Siendo necesaria la realización estudios preliminares y especificaciones detalladas para asegurar la compatibilidad del sistema con la estructura existente, el propósito del proyecto y las condiciones climáticas y medioambientales del lugar de instalación.

En la selección del sistema más apropiado, se han consideraron estudios estructurales que proporcionan una visión general sobre la factibilidad de cada opción. En caso de requerirse adaptaciones se deben considerar gastos extras que no se tomaran en cuenta ya que, bajo la premisa de mantener la practicidad, se optó por solicitar información considerando una estructura que

pueda acomodar diferentes sistemas de techo verde, evitando gastos adicionales asociados a modificaciones en la edificación y asegurando una solución sostenible y viable para el proyecto.

Esta metodología de evaluación y selección del sistema de techo verde es fundamental para maximizar los beneficios ambientales y económicos de la edificación, contribuyendo a la sostenibilidad y eficiencia del proyecto en su totalidad.

Selección de especies para un TV. En el diseño de sistemas naturales como los techos verdes, es crucial la selección de plantas que requieran poco mantenimiento, puedan adaptarse a las condiciones extremas del lugar de plantación y proporcionen una cobertura vegetal rápida y duradera. De acuerdo con Ordóñez-López, Zetina-Moguel, & Pérez-Cortés (2012), las condiciones generales a las que la vegetación deberá enfrentarse en este sistema son las siguientes:

- Alta radiación solar (cuando la vegetación está dispuesta horizontalmente u orientada hacia el sol).
- Escaso volumen de suelo (predominantemente mineral).
- Largos periodos de sequía.
- Temperaturas extremas.
- Condiciones de nulo mantenimiento.

Para realizar la selección adecuada de especies vegetales, se consultaron estudios previos que han permitido comprender las necesidades específicas de los sistemas de cubierta verde. Esta información ha sido invaluable para describir características suficientes y determinar el tipo de vegetación más apropiada tanto para cubiertas extensivas como intensivas.

El análisis realizado permitió la identificación de las cubiertas extensivas, concluyendo en que estas requieren menos necesidades de mantenimiento, y permitió descubrir especies vegetales que

demandan un menor cuidado y ofrecen una resiliencia adecuada para adaptarse al clima local de nuestra zona de estudio.

La selección cuidadosa de especies para los techos verdes es esencial para garantizar un sistema sostenible, de fácil manejo y con la capacidad de soportar las condiciones ambientales extremas de la región. Con esta estrategia, se buscó no solo maximizar los beneficios ambientales, sino también asegurar la viabilidad y durabilidad a largo plazo de los sistemas de cubierta verde. En el proceso de diseño, se consideraron una serie de características específicas para techos verdes extensivos e intensivos, teniendo en cuenta que cada uno de ellos requería un espacio vegetal distinto, adaptado a su contexto y uso previsto.

Los techos verdes extensivos se caracterizan por sugerir una vegetación menos predominante y no son transitables. Se priorizaron especies vegetales que demanden bajos niveles de mantenimiento y que sean capaces de establecer una cobertura vegetal duradera con una mínima intervención. Estos techos extensivos son ideales para proporcionar beneficios ambientales y mejorar el aspecto estético de las construcciones, sin requerir un uso activo por parte de las personas (López González, Camacho Vera, Martínez Rodríguez, & Marcelino Aranda, 2020).

Los parámetros específicos para la selección de especies vegetales en techos verdes se encuentran detallados en la Tabla 1, donde se dan a conocer características físicas del tipo de vegetación a introducir en el sistema extensivo e intensivo, y en la Tabla 2 que describe el tipo de especie más recomendable según las necesidades específicas de cada sistema. Estas tablas ofrecen información sobre las especies más adecuadas para ambos tipos de techos verdes, teniendo en cuenta su resistencia al tránsito, nivel de mantenimiento requerido, espesor del sustrato y capacidad para prosperar en las condiciones ambientales específicas del lugar de instalación. En el caso de

los techos verdes extensivos, se caracterizan por sustratos menos profundos y una mayor capacidad de adaptación que requiere menos mantenimiento.

La diversidad de vegetación en los techos verdes intensivos no solo ofrece un atractivo estético, sino que también contribuye a la mejora del medio ambiente urbano, promoviendo la biodiversidad y brindando espacios verdes para el disfrute de los residentes y visitantes.

Al considerar la diversidad y resistencia de las especies vegetales en los techos verdes intensivos, se busca crear espacios verdes duraderos y funcionales que enriquezcan la calidad de vida en entornos urbanos, mientras contribuyen a la sostenibilidad y el bienestar de la comunidad.

Tabla 1

Comparativa de Características Físicas y Vegetales para Techos Verdes Extensivos e Intensivos

Características	Extensivo	Intensivo
Espesor de sustrato	Hasta 15 cm	Mayor a 15 cm
Cobertura Vegetal Transitable	No transitable	Transitable
Peso saturado	Entre 50 y 170 kg/m ²	Mayor que 245 kg/m ²
Diversidad vegetal	Poca	Máxima
Mantenimiento	Mínimo	Alto
Tipo de vegetación	Rastreras (SEDUM)	Arbustos y árboles pequeños

Nota. Elaboración propia con información de: Getter, & Rowe (2006), Berndtsson et. al.(2010), Ondoño & Stovin (2017), Mentens, Raes & Hermy (2006) y Dunnett, Nagase & Hallam (2008).

Tabla 2

Grupos de plantas recomendadas para techos verdes extensivos en función de su espesor y accesibilidad.

Espesor medio de crecimiento	Inaccesible/Invisible	Inaccesible/Visible desde una distancia lejana	Inaccesible/Visible desde una distancia cercana	Accesible
0 - 5 cm	Sedum	Sedum	Sedum	Sedum
5 - 10 cm		Gramíneas, vegetación alpina, y bulbos pequeños que resisten la sequía	Gramíneas, vegetación alpina, y bulbos pequeños que resisten la sequía	Gramíneas, vegetación alpina, y bulbos pequeños que resisten la sequía
10 - 20 cm			Mezcla semi extensiva de gramíneas y árboles de tamaño bajo que resisten la sequía. Arbustos pequeños y césped-	Mezcla semi extensiva de gramíneas y árboles de tamaño bajo que resisten la sequía. Arbustos pequeños y césped-
20 - 50 cm				Pequeños arbustos, plantas comestibles, plantas perennes y césped

Tabla 2. *Continuación.*

Más de 50 cm	Pequeños árboles de hoja caduca y coníferas (ej.: ciprés de Leyland).
-----------------	--

Nota. Elaboración propia con información de: Getter & Rowe (2006), Berndtsson et. al.(2010) y Dunnett, Nagase & Hallam (2008).

Instalación de los sistemas de cubiertas verdes. La empresa que brindó información sobre el proceso de cotización fue Proyecto, Diseño y Construcción (PRODICONS), una constructora oaxaqueña con experiencia previa en proyectos similares. El proceso de instalación se dividió en seis etapas, como se detalla en el Anexo 1. La primera etapa involucró una evaluación estructural supervisada por un ingeniero especializado en esta área. Se calcularon los costos asociados con la estructura soportante y se consideró la inclinación del techo. La construcción se trató de un hogar promedio, tomando como referencia una Casa Infonavit estándar de concreto y ladrillo, que consta de aproximadamente 50 a 70 m² de construcción y un terreno de entre 80 y 100 m². Por lo tanto, se asumieron disposiciones básicas para implementar una cubierta vegetal verde del tipo extensivo, lo que evitó la necesidad de realizar modificaciones estructurales, ya que se consideraba una estructura existente con la capacidad de soportar el peso adicional.

Para la impermeabilización, se empleó como referencia el material más común y económico del mercado, la membrana asfáltica, ya que presenta las características necesarias para soportar el sistema. Se seleccionaron materiales y técnicas establecidas por empresas especializadas en arquitectura verde con el objetivo de reducir costos y aumentar la durabilidad del sistema. Se optó

por utilizar plantas del tipo 'sedum' debido a su resiliencia, y se eligieron medios orgánicos adecuados como sustrato para el crecimiento de las plantas, asegurando un excelente drenaje y evitando la acumulación de agua.

Se planearon salidas de drenaje en el marco de contención del techo verde, lo que permite que el agua fluyera hacia las canaletas del techo. Además, se contempló la inclusión de una membrana que facilita el flujo del agua mientras bloquea la suciedad. También se consideró la opción de utilizar un sistema de drenaje de espuma de polietileno junto con una lámina de geotextil permeable para proteger la estructura inferior de las raíces y mejorar el rendimiento del sistema. Se evaluó la posibilidad de colocar capas de grava marmolina para prevenir obstrucciones en el drenaje y controlar el crecimiento de la vegetación a lo largo de los bordes del techo verde. La cantidad de metros cuadrados a cubrir determinó la cantidad necesaria de materiales.

En el Anexo 1, se detallan los costos asociados a cada etapa de instalación, incluyendo un porcentaje destinado a la mano de obra, materiales y equipo profesional. Es importante señalar que el presupuesto no incluyó el diagnóstico estructural de la vivienda, ya que este solo proporciona un estimado de honorarios y puede variar según las necesidades y recomendaciones de cada ingeniero estructural para realizar cambios estructurales en la edificación. El proceso de instalación de los sistemas de cubiertas verdes se llevó a cabo con especial atención a los detalles técnicos y la selección de proveedores y profesionales calificados para garantizar la correcta implementación y el éxito a largo plazo del techo verde.

VI.1.1.2. Instalación de sistemas de cubiertas claras. En el caso de los techos claros, se realizó un análisis basado en dos tipos de ellos, considerando los materiales utilizados en su instalación proporcionados por la empresa especializada en el área, en este caso PRODICONs. Se definieron techos claros instalados mediante recubrimientos líquidos aplicados, utilizando

métodos convencionales de impermeabilización con colores claros como el blanco, y también membranas prefabricadas de una sola capa en color blanco, estas características en la implementación de ambos tipos de techos claros se describen en la Tabla 3.

Tabla 3.
Características de la implementación de un techo claro (TC) según los materiales utilizados.

Techo claro	Usos	Reflectancia Solar	Emisividad	Vida útil (años)
		Recubrimientos líquidos aplicados		
Blanco	Revestimiento	75-80%	0.87	5 a 10
		Membranas prefabricadas		
Una sola capa (blanco)	Re-techado /Nueva construcción	75-80%	0.80	8 a 15

Nota. Tabla rescatada de Recomendaciones Técnicas para Proyectos de Cubiertas Vegetales (2010).

Con el apoyo de un profesional especializado en la materia, se llevó a cabo un análisis detallado de las distintas fases y costos asociados con la instalación de techos claros. Los valores promedio obtenidos se encuentran presentados en el Anexo 2, teniendo en cuenta los materiales, el equipo profesional y la mano de obra requeridos para ambos tipos de techos claros evaluados.

La selección de techos claros como parte del análisis se enfocó en promover soluciones que contribuyan a la eficiencia energética de las edificaciones, reduciendo la absorción de calor y, por ende, el consumo de energía para el enfriamiento interior. La instalación adecuada de techos claros con materiales de alta emisividad y reflectancia solar resulta fundamental para maximizar sus beneficios y contribuir a la sostenibilidad y el confort en los espacios habitables.

VI.1.1.3. Instalación de sistemas de muros verdes. En el marco de esta investigación sobre medidas de mitigación para combatir el efecto de ICU, se consideró la incorporación de muros verdes como una estrategia prometedora. Estos muros, compuestos por vegetación en estructuras verticales, han demostrado su capacidad para reducir las temperaturas locales, aumentar la humedad relativa y mejorar la calidad del aire en entornos urbanos (Smith et al., 2020). Sin embargo, se enfrentaron desafíos en la fase de recolección de datos, específicamente en la obtención de presupuestos precisos para la instalación de los muros verdes debido a la falta de respuesta por parte de las empresas en este campo de estudio.

En el contexto de esta investigación, se optó por emplear una estrategia alternativa. Dado que la literatura científica y técnica proporcionó información valiosa sobre la implementación de muros verdes en diferentes contextos urbanos, se decidió recurrir a esta fuente para rescatar valores estimativos de costos asociados. A través de un análisis exhaustivo de estudios previos y reportes especializados, se logró identificar rangos de costos en el proceso de instalación, los cuales se encuentran reflejados en la matriz final (Tabla 6).

VI.1.1.4. Instalación de arbolado urbano. En esta fase, se propuso la intervención de un jardinero local considerando una instalación de árboles menores con un perímetro de tronco de hasta 14 cm a 1 m del suelo, empleando métodos manuales en terreno arcilloso, por recomendación del mismo debido a la mejor retención de agua, aporte de nutrientes y estructura densa y compacta.

Dentro del proceso se contempló la incorporación de un 25% de suelo vegetal/humus cribado al hoyo de plantación de dimensiones 60x60x60 cm, con un suministro de árboles con raíz desnuda.

En el análisis del proceso se incluyó el replanteo del área de instalación como método inicial, así como la apertura del hoyo mediante métodos manuales. La preparación del fondo del hoyo se consideró para garantizar una base adecuada para el árbol. Durante el relleno del hoyo, se contempló una mezcla de suelo seleccionado de la excavación y tierra vegetal cribada, lo que proporcionaría un ambiente óptimo para el crecimiento saludable de los árboles.

El Anexo 3 se muestran los costos asociados con el material por m³, las herramientas auxiliares consideradas durante el procedimiento, los gastos relacionados con la obtención de especies vegetales endémicas con las características mencionadas anteriormente, y el costo de la mano de obra involucrada en todo el proceso.

Con esta metodología de instalación de arbolado urbano, se buscó contribuir a la mejora del entorno urbano mediante el aporte de servicios ecosistémicos a la comunidad. Además, la implementación cuidadosa y profesional de estos árboles menores en terrenos arcillosos garantiza un desarrollo sostenible y estético en el paisaje urbano.

Propuesta de especies vegetales a utilizar en la zona de estudio. Considerando las especificaciones previas, se realizó una cuidadosa selección de especies vegetales que se ajustaran a las dimensiones adecuadas para su replantación en la zona de estudio. Se priorizó la elección de especies con raíces poco profundas para evitar complicaciones en su proceso de crecimiento en el entorno urbano. Además, se dio preferencia a especies nativas que fueran capaces de sobrevivir en climas cálidos y subhúmedos, asegurando su adaptabilidad al entorno local.

Tomando en cuenta estas especificaciones, se obtuvo una lista de ocho especies vegetales que representan la mejor opción para afrontar los desafíos adaptativos de la zona. Estas especies no solo se adecuan a las condiciones locales, sino que también proporcionan diversos beneficios ambientales a la localidad. En la Tabla 4, se presentan las ocho especies vegetales seleccionadas, junto con sus características adaptativas y físicas. Entre los beneficios se destacan la mejora de la calidad del aire, la regulación de la temperatura, el control de erosión y escorrentía, la reducción del ruido, el embellecimiento de los espacios urbanos, así como la promoción de la salud mental y el bienestar de los residentes.

Esta propuesta de especies vegetales busca contribuir significativamente a la creación de un entorno urbano más sostenible y armonioso, donde la naturaleza y el bienestar de la comunidad converjan en beneficio de todos los habitantes de la zona de estudio.

Tabla 4*Especies vegetales nativas recomendadas para la región de Tuxtla Gutiérrez.*

Especies vegetales	Características adaptativas	Características físicas
<i>Platymiscium pinnatum</i> (Maculís, también conocido como Coyote)	Especie nativa de la región, con raíces poco profundas y una hermosa floración	<ul style="list-style-type: none"> - Altura promedio: Puede alcanzar hasta 25 m. - Diámetro de tronco: Tiene un diámetro de tronco de 50 a 100 cm. - Copa: Amplia y redondeada, con hojas grandes y flores pequeñas.
<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Tajibo, también conocido como Lapacho)	Árbol de gran porte con flores coloridas y raíces superficiales.	<ul style="list-style-type: none"> - Altura promedio: Puede medir entre 15 y 25 m. - Diámetro de tronco: Generalmente tiene un diámetro de tronco de 40 a 80 cm - Copa: Amplia y extendida, con hojas compuestas y flores coloridas.
<i>Cordia collococca</i> (Patabán)	Árbol pequeño con raíces poco invasivas, ideal para áreas urbanas y espacios reducidos.	<ul style="list-style-type: none"> - Altura promedio: Puede medir entre 5 y 15 m. - Diámetro de tronco: Tiene un diámetro de tronco de 20 a 50cm. - Copa: Amplia y frondosa, con hojas grandes y flores pequeñas.
<i>Guazuma crinita</i> (Majagua)	Especie de tamaño mediano con raíces poco invasivas y un tronco distintivo.	<ul style="list-style-type: none"> - Altura promedio: Puede medir entre 10 y 15 m. - Diámetro de tronco: Generalmente tiene un diámetro de tronco de 30 a 60cm. - Copa: Amplia y redondeada, con hojas grandes y flores pequeñas.

Tabla 4. Continuación.

<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Guaje)	Es una especie de gran tamaño con raíces superficiales y hojas grandes, que proporciona sombra y atrae vida silvestre.	- Altura promedio: Puede alcanzar hasta 25 m. - Diámetro de tronco: Generalmente tiene un diámetro de tronco de 60 a 120 c. - Copa: Amplia y extendida, con hojas compuestas y flores pequeñas.
<i>Bursera aloexylon</i> (Pochote)	Árbol nativo de América tropical con raíces poco invasivas, amplia copa y una corteza peculiar.	- Altura promedio: Puede medir entre 15 y 25 m. - Diámetro de tronco: Tiene un diámetro de tronco de 30 a 60 cm. - Copa: Amplia y redondeada, con hojas verdes y flores pequeñas.
<i>Tabebuia donnell-smithii</i> (Roble amarillo mexicano)	Otra variedad de <i>Tabebuia</i> con hermosas flores amarillas, ideal para climas tropicales.	- Altura promedio: Puede llegar a medir entre 10 y 20 m. - Diámetro de tronco: Aproximadamente de 30 a 60cm. - Copa: Amplia, con hojas caducas y flores amarillas vistosas.
<i>Guazuma ulmifolia</i> (Guácimo, también conocido como Cuaulote)	Es un árbol nativo de América tropical, con raíces poco invasivas y resistente a condiciones urbanas.	- Altura promedio: Puede alcanzar hasta 20 m. - Diámetro de tronco: Generalmente tiene un diámetro de tronco de 30 a 60cm. - Copa: Amplia y redondeada.

Nota. Elaboración propia con información de Zamora (2016).

VI.1.1.5. Análisis de los Costos de Instalación por m² de las Medidas de Mitigación para la ICU.

Tras completar el proceso de selección de especies y llevar a cabo un análisis preliminar del enfoque cuantitativo de los proyectos propuestos, se han obtenido los siguientes valores, detallados en la Tabla 5, que reflejan los costos finales asociados con las medidas de mitigación de la ICU rescatados de los presupuestos solicitados de los Anexos 1, 2 y 3.

Tabla 5.

Costos finales asociados al proceso de instalación de medidas de mitigación para la ICU por m².

Medidas de Mitigación	Techos verdes extensivos	Techos claros (recubrimientos líquidos aplicados en blanco)	Membranas prefabricadas de una sola capa en blanco	Instalación de arbolado urbano
Costo Total de	\$2,307.15MXN	\$271.90MXN	\$321.32	\$3,379.98MXN
Instalación por m ² (MXN)				
Costo Total de	140.77USD	16.59USD	19.60USD	206.22USD
Instalación por m ² (USD)	(2024)	(2024)	(2024)	(2024)

Nota. Elaboración propia con datos de los presupuestos facilitados por la empresa PRODICONs.

Además, se revisaron estudios previos relacionados con la instalación de sistemas de mitigación para la ICU mencionados anteriormente y, contribuyendo a la falta de un costo actual determinado por una constructora especializada, se recopilamos datos sobre los costos de instalación, obtenidos

de diversos recursos digitales. Retomando estudios como el realizado en España, donde estimó que el costo de implementación de un techo verde extensivo osciló entre €30 (\$628.68MXN) y €60 (\$1,257.35MXN) por m^2 , dependiendo de la ubicación y los servicios adicionales requeridos, como el riego automatizado (Jiménez et al., 2019). De esta forma se logró obtener una estimación del proceso de instalación desde una perspectiva distinta a la que se había analizado hasta ahora. Esto permitió incluso comparar los valores proporcionados por la empresa mencionada anteriormente con los que existen en la literatura.

En lo que respecta a los sistemas para los cuales no se había podido proporcionar un valor actual, es decir, aquellos para los cuales la empresa no contaba con un presupuesto designado, también se lograron abordar mediante el mismo procedimiento. Al revisar estudios como el realizado en España, donde el costo promedio de implementación de un jardín vertical osciló entre €200 (\$4,191.18MXN) y €400 (\$8,382.36MXN) por m^2 (Jiménez et al., 2019), se pudieron completar estos espacios vacíos, lo cual se reflejó en la matriz final.

Por último, estos valores recopilados se presentan en la Tabla 6, mostrando los rangos mínimos y máximos para cada sistema de mitigación, junto con las fuentes de los estudios de los cuales se obtuvieron estos datos, los cuales fueron utilizados para elaborar la matriz final. En la misma tabla, se detallan los costos en la moneda nacional, calculados según la tasa de conversión de cada moneda al año actual.

Tabla 6

Rangos de costos mínimos y máximos para la implementación de sistemas de mitigación para la ICU, según la literatura revisada.

Medidas de Mitigación	Costos mínimos de instalación por m ² según la literatura	Costos máximos de instalación por m ² según la literatura	Costos mínimos de instalación por m ² según la literatura (MXN 2024)	Costos máximos de instalación por m ² según la literatura (MXN 2024)
Techos Verdes	€30 - €60	€40 - €80	\$530.37 -	\$707.16 -
Extensivos	(Jiménez et al., 2019)	(Köhler et al., 2002)	\$1,060.74 (Jiménez et al., 2019)	\$1,414.32 (Köhler et al., 2002)
Techos Verdes Intensivos	€100 - €150 (Köhler et al., 2002)	€150 - €200 (Jiménez et al., 2019)	\$1,767.90 - \$2,651.84 (Köhler et al., 2002)	\$2,651.84 - \$3,535.79 (Jiménez et al., 2019)
Jardín Vertical o Muro Verde	€200 - €400 (Jiménez et al., 2019)	SGD 300 - SGD 500 (Wong et al., 2012)	\$2,651.84 - \$7,071.58 (Jiménez et al., 2019)	\$3,652.11 - \$6,086.85 (Wong et al., 2012)
Techos claros (recubrimientos líquidos)	21 USD (National Roofing Contractors Association, 2019)	65 USD (National Roofing Contractors Association, 2019)	\$346.21 (National Roofing Contractors Association, 2019)	\$1,071.59 (National Roofing Contractors Association, 2019)

Tabla 6. Continuación.

Techos claros (membranas prefabricadas)	AUD \$30 (Australian Institute of Architects, 2019)	AUD \$50 (Australian Institute of Architects, 2019)	\$321.35 (Australian Institute of Architects, 2019)	\$535.58 (Australian Institute of Architects, 2019)
Arbolado Urbano	84 USD (Nowak et al., 2008)	235 USD (Nowak et al., 2008)	\$1,384.82 (Nowak et al., 2008)	\$3,874.21 (Nowak et al., 2008)

Nota. Los costos mínimos y máximos fueron obtenidos de distintos estudios citados. La conversión a la moneda nacional mexicana se basa en la tasa de cambio del año 2024.

VI.1.2. Análisis de los Beneficios

VI.1.2.1. Servicios ecosistémicos.

Calidad del aire. En beneficio de la sociedad, se tendrán en cuenta aspectos relacionados con la calidad del aire. En este contexto, se plantea el análisis de los beneficios asociados con la reducción de las ICU y la retención de contaminantes atmosféricos. En este sentido, ponderaron valores en términos de contaminantes a reducir, especialmente en relación a la captura de CO₂. Además de los beneficios en calidad del aire y reducción térmica como consecuencia de la implementación de estas medidas de mitigación.

La metodología aplicada implicó la recopilación de datos provenientes de diversas investigaciones sobre los contaminantes absorbidos durante la implementación de las medidas de mitigación mencionadas en el documento. Estos datos se utilizaron para construir una tabla que

incluyera valores promedio para cada categoría, considerando tanto los valores más altos como los más bajos identificados en los estudios revisados.

Según Berndtsson et al. (2010), un techo verde extensivo con sedum puede capturar entre 0.5 kg y 1 kg de contaminantes por m² al año. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta que esta cifra puede variar según las condiciones específicas de cada techo verde y su entorno.

Por otro lado, Berardi & GhaffarianHoseini (2014) descubrieron que los techos verdes intensivos pueden contribuir a reducir la concentración de partículas finas (PM_{2.5}) y otros contaminantes atmosféricos en el aire. Además, un estudio realizado por Rowe, Monterusso y Rugh (2006) demostró que los techos verdes intensivos también pueden ayudar a disminuir la concentración de metales pesados y otros contaminantes en el agua de esorrentía.

Para elaborar la matriz final, se requirió consultar estos y otros estudios relacionados con la captura de contaminantes. Los resultados de estas investigaciones se recopilaron en la Tabla 7, donde se presentan los valores junto con las referencias bibliográficas correspondientes.

Tabla 7.*Datos sobre la Captura de Contaminantes por Medida de Mitigación para la ICU.*

Medidas de Mitigación	Techo verde extensivo	Techo verde intensivo	Jardín Vertical	Techo claro	Arbolado Urbano
Captura de CO2 en kg por año	0.5 kg – 1 kg (Berndtsson, 2010)	S/C	N/D	N/A	0.45 – 4.5 kg
			(Gómez-Baggethun et al., 2018)		(Nowak et al., 2013)
					0.1 kg – 1.5 kg (Escobedo et al., 2011)
	2.5 kg de CO2/año (Stovin, Poë, 2016)				0.1 kg – 1.2 kg (McPherson et al., 2013)
					0.1 kg – 4.5 kg (Nowak et al., 2018)
Reducción de concentración de partículas finas (PM2.5)	S/C	N/D		S/C	S/C
		(Berardi & GhaffarianHoseini, 2014)			

Nota. Cuando no se cuenta con un dato preciso, pero se sabe que cumple con el requisito, se ha utilizado una notación específica para indicar esta situación. Las opciones incluyen "N/D" (no disponible), "N/A" (no aplicable) o "S/C" (sin información). Esto permite señalar que, aunque el dato no está disponible de manera precisa, se reconoce que la condición se cumple o existe.

Captación de agua de lluvia. Dentro del análisis, se abordó el parámetro de captación de agua de lluvia, considerando la capacidad de retención de agua en función de los materiales utilizados en la implementación de las medidas de mitigación estudiadas en este documento. Es importante tener en cuenta el porcentaje de agua de lluvia que estos sistemas pueden absorber sin llegar a la saturación, ya que un exceso de agua podría tener consecuencias contraproducentes, como un aumento del peso sobre la estructura de los techos verdes, lo cual podría generar riesgos de derrumbes. Sin embargo, también es importante considerar que esta captación de agua de lluvia es un beneficio ambiental que puede funcionar como un filtro de contaminantes debido al proceso al que se ve sometida.

Las infraestructuras verdes son propuestas como una tecnología sostenible, en la medida que tienen la capacidad de captar agua de lluvia, reduciendo el riesgo a inundaciones por empozamiento de agua pluvial. El empleo del agua de lluvia en sustitución del agua potable para determinados usos (descarga de inodoros, riego, o lavadoras), puede ser tomada en cuenta como alternativa para la mejora de la eficiencia del uso de recursos hídricos (Patiño et al., 2011).

En este contexto, se han recopilado datos provenientes de diversas investigaciones acerca de la captación de agua de lluvia y la reducción de inundaciones. Por ejemplo, el estudio de Berndtsson (2010) revela que los techos verdes extensivos pueden retener entre el 50% y el 90% del agua de

lluvia que cae sobre ellos. Otro estudio, realizado por Mentens et al. en 2006, encontró que los techos verdes intensivos pueden captar y retener hasta el 90% de la precipitación anual, destacando la importancia de la combinación de vegetación densa, sustrato adecuado y sistemas de drenaje eficientes. Asimismo, Wong et al. (2017) investigaron la capacidad de los muros verdes para captar y retener agua de lluvia en un entorno tropical, concluyendo que estos pueden retener entre el 30% y el 60% del agua de lluvia, dependiendo de diversos factores.

Estos estudios, junto con otros, han enriquecido la tabla comparativa sobre la captación de agua de lluvia, la cual nutre la matriz final y se presenta en la Tabla 8, permitiendo una visualización más clara de aquellos estudios que resaltan este importante servicio ecosistémico derivado de la instalación de los sistemas mitigatorios mencionados.

Es importante resaltar que estos beneficios son observados únicamente en sistemas verdes, con esto nos referimos a que, en gran medida este fenómeno se ve mitigado debido a la retención de agua pluvial por las raíces de los árboles, identificando este como un método mucho más económico y con beneficios a mayor escala.

La contaminación representa otro desafío importante. Cuando la lluvia cae sobre una ciudad, el agua se satura de contaminantes. Estos contaminantes son posteriormente transportados por tuberías subterráneas hacia ríos y lagos, lo que puede provocar la contaminación del agua potable. Las plantas en los techos verdes filtran el agua de lluvia, eliminan toxinas nocivas y reducen el riesgo de contaminación del agua potable.

Tabla 8

Porcentaje de Captación de Agua de Lluvia por Medidas de Mitigación para la Infraestructura de Control Urbano (ICU): Recopilación de Estudios.

Medidas de Mitigación	Techo verde extensivo	Techo verde intensivo	Jardín Vertical	Techo claro	Arbolado Urbano
Captación de agua de lluvia (%)	50% y el 90% (Berndtsson, 2010). 70% (Li et al., 2013) 50% - 80% (Rowe & Getter, 2013)	70% (Li et al., 2013) 90% (Mentens et al., 2006)	25% - 50% (Berardi, 2012) 30% - 60% (Wong et al., 2017)	N/A	30% - 100% (McPherson et al., 1997) 50% (Pataki et al., 2011) 30% - 50% (USDA Forest Service, 2019)

Nota. En caso de carecer de un dato se ha adoptado una notación específica: "N/A" (no aplicable), para indicar esta situación.

Aumento de la diversidad de especies. El incremento de la diversidad de especies también puede fomentar una conexión más profunda con la naturaleza, lo que, a su vez, puede inspirar a las personas a convertirse en defensores del medio ambiente. En este contexto, se consideraron aquellos sistemas que pueden fomentar el crecimiento de la diversidad de especies, donde la presencia de un entorno vegetal se convierte en un factor crucial. Por lo tanto, las cubiertas sin

vegetación serían automáticamente excluidas, al no poder sostener la presencia de vida vegetal. En consecuencia, no se evaluaron en función de la cantidad de especies, sino en la capacidad de albergar organismos vivos en el sistema, como se menciona en la Tabla 9.

Tabla 9

Presencia de diversidad de especies en los sistemas de mitigación para la ICU.

Medidas de Mitigación	Techo verde extensivo	Techo verde intensivo	Jardín Vertical	Techo claro	Arbolado Urbano
Presencia de diversidad de especies	S/A	S/A	S/A	N/A	S/A

Nota. En caso de que la condición aplique en el sistema, se ha utilizado una notación específica para indicar esta situación. Las opciones son 'S/A' (si aplica) o 'N/A' (no aplica).

VI.1.2.2. Beneficios privados.

Reducción de la temperatura. Se realizaron búsquedas en diversas bases de datos académicas mediante una combinación de palabras clave relacionadas. Los estudios pertinentes fueron seleccionados meticulosamente, como el llevado a cabo en España, donde se estimó que un techo verde extensivo puede reducir la temperatura en el entorno circundante en un promedio de 2 a 4 °C durante los días calurosos de verano (Jiménez et al., 2019), o el realizado en Australia, donde se encontró que los techos verdes extensivos pueden disminuir la temperatura en el techo en un

promedio de 2 a 4 °C y en el entorno en un promedio de 1 a 2 °C durante los días calurosos de verano en dicho país (Liu et al., 2016).

Estos estudios fueron seleccionados debido a su pertinencia y calidad metodológica, abordando aspectos específicos de interés para este trabajo. Su integración en la Tabla 10 refleja el amplio espectro de datos recopilados del reservorio bibliográfico consultado, lo cual facilitó el análisis representado en la matriz final.

Tabla 10.

Evidencia Bibliográfica sobre la Reducción de la Temperatura en ICU mediante Sistemas de Mitigación.

Medidas de Mitigación	Techo verde extensivo	Techo verde intensivo	Jardín Vertical	Techo claro	Arbolado Urbano
Reducción de temperatura en °C	1 - 3 °C	2 - 4 °C	1 - 3 °C		1 - 3 °C
	(Köhler et al., 2002)	(Wong et al., 2003)	(Wong et al., 2018)		(Sanusi et al., 2019)
					1 - 5 °C (Li et al., 2019)
	2 - 4 °C	3 - 10 °C		2 - 5 °C	2 - 6 °C
	(Jiménez et al., 2019), (Liu et al., 2016)	(Oberndorfer et al., 2007)		(Akbari et al., 2001)	(Coutts et al., 2012)

Tabla 10. *Continuación.*

2 - 8 °C	2 - 8 °C (Lee	2 - 8 °C
(Berardi,	& Kim,	(Akbari et al.,
2013),	2015)	2001)
(Stovin et al.,		
2012)		
4 - 10 °C		
(Jiménez et		
al., 2019)		

Nota. Los datos están organizados de manera ascendente y están respaldados por referencias bibliográficas correspondientes.

A lo largo de la investigación, se identificó que uno de los problemas significativos asociados al fenómeno de ICU es el aumento de la temperatura, provocado por los materiales empleados en la construcción de techos tradicionales, los cuales tienen una alta retención de calor, generando una sensación térmica elevada. En este contexto, se observó que los sistemas de infraestructura verde estudiados comparten la cualidad de reducir la temperatura en diferentes rangos, dependiendo de los materiales utilizados en su composición. Por tanto, el objetivo se situó en analizar y ponderar los datos de disminución de temperatura registrados en la literatura, con el fin de destacar este atributo y determinar qué sistema ofrece los mejores resultados en este ámbito. Para lograr este objetivo, se consideraron tanto los valores mínimos como los máximos encontrados en las investigaciones plasmadas en la Tabla 10, los cuales fueron utilizados para alimentar la matriz final de análisis.

Reducción en costos de energía. Los efectos de enfriamiento de los techos verdes también pueden ahorrar dinero a las personas. En verano, los techos verdes enfrían edificios enteros, lo que reduce la necesidad de usar aire acondicionado.

Dado que mejoran el aislamiento, también mejoran la retención de calor en los edificios durante los meses más fríos. Como resultado, los techos verdes pueden reducir significativamente los costos de energía para un edificio. Siguiendo esta línea, es posible conducir el estudio de reducción de costos de energía con base a la disminución de temperatura. Es decir, una conecta a la otra. Es así que se entiende que la reducción de energía eléctrica es consecuencia de un techo funcional, es decir, capaz de cumplir con su objetivo principal, mitigar los efectos de la ICU. Entendiendo esto, no existe forma de descartar ninguno de los sistemas ya definidos ya que en mayor o menor escala son capaces de reducir la temperatura y, por ende, los costos en la utilización de servicios como lo es el aire acondicionado.

Estudios como el realizado por Hernández, S. et al. (2017) en la Ciudad de México, encontraron que los techos verdes extensivos pueden reducir la demanda de energía para la refrigeración en un rango del 10% al 30%, dependiendo de las condiciones climáticas y las características específicas del techo verde en un clima cálido-árido. Asimismo, una investigación llevada a cabo en Cancún, México, también encontró que los techos verdes extensivos pueden disminuir la demanda de energía para la refrigeración en un rango del 20% al 40% (Hernández et al., 2019). Estos estudios ofrecen una visión más detallada de los beneficios derivados de la reducción de costos en energía eléctrica, y dichos beneficios se ven reflejados en la Tabla 11. Esta tabla recopila datos provenientes de investigaciones previas, obtenidos de fuentes digitales confiables, los cuales han

permitido establecer rangos de valores mínimos y máximos en porcentajes de reducción en el consumo energético. Estos datos fueron fundamentales para alimentar la matriz final de análisis.

Tabla 11.

Porcentaje de Reducción de Costos Energéticos Mediante Sistemas de Mitigación para la ICU.

Medidas de Mitigación	Techo verde extensivo	Techo verde intensivo	Jardín Vertical	Techo claro	Arbolado Urbano
Porcentaje de reducción en consumo energético	10% - 30% (Li et al., 2017), (Hernández et al., 2017)	10% - 30% (Berardi et al., 2014)	10% - 25% (Wong et al., 2018)	10% - 20% (Levinson & Akbari, 2010)	5% - 15% (Hernández et al., 2019)
	6% - 25% (Getter et al., 2009)			10% - 40% (Akbari et al., 2001)	
	20% - 40% (Hernández et al., 2019)				
		25% - 50% (Getter et al., 2009)			15% - 50% (McPherson et al., 2013)

Nota. Los datos están organizados de manera ascendente y están respaldados por referencias bibliográficas correspondientes.

Reducción del ruido. Las cubiertas verdes como los muros de fachadas en los edificios y las cubiertas vegetales nos ayudan a reducir el ruido en núcleos urbanos. Y esto tiene que ver en gran parte con los materiales empleados. Así, los sistemas empleados con base a sustratos orgánicos (los que se utilizan para proporcionar una superficie para el crecimiento de plantas) son los que representan una mayor reducción de ruido, llegando a la disminución de 10 decibeles (Yang, Li & Skitmore, 2018).

La recopilación se basa en valores extraídos previamente de la literatura disponible. Por ejemplo, Konijnendijk et al. (2013) examinaron la capacidad del arbolado urbano para reducir el ruido en áreas urbanas de diversas ciudades europeas. Este estudio reveló que los árboles urbanos pueden disminuir el ruido en un promedio de entre 0.5 dB y 6 dB, dependiendo de factores como la especie de árbol, la densidad arbórea y la distancia entre los árboles y las fuentes de ruido.

Los datos recopilados se presentan en la Tabla 12, la cual ofrece una compilación que muestra el desempeño de los sistemas de mitigación seleccionados en estudios anteriores sobre reducción de ruido. Estos valores se han obtenido a partir de una recolección bibliográfica y están organizados de manera ascendente. Esta disposición facilita el análisis y la selección para la construcción de la matriz final.

Tabla 12

Desempeño de Sistemas de Mitigación Para la ICU en la Reducción de Ruido: Datos Recopilados de Estudios Previos.

Medidas de Mitigación	Techo verde extensivo	Techo verde intensivo	Jardín Vertical	Techo claro	Arbolado Urbano
Reducción del ruido en decibeles (dB)	8 dB (Yang et al., 2015).	3 - 10 dB (Getter et al., 2009b)	3 - 8 dB (Kang et al., 2012)	N/A	0.5 - 2 dB (Gidlöf-Gunnarsson et al., 2012)
		8 - 10 dB (Yang et al., 2018)	3 - 10 dB (Pugh et al., 2012)		0.5 - 3 dB (Maas et al., 2009)
					0.5 - 6 dB (Konijnendijk et al., 2013)
					1.5 - 4 dB (Kang et al., 2012)

Nota. Los datos están organizados de manera ascendente y están respaldados por referencias bibliográficas correspondientes. En caso de que la condición no aplique en el sistema, se ha utilizado una notación específica para indicar esta situación: 'N/A' (no aplica).

Incentivos económicos en políticas públicas en México. En el caso de los incentivos, se evaluaron únicamente aquellos que son aplicables en los sistemas mitigatorios seleccionados en el contexto nacional. Sin embargo, es importante señalar que durante el proceso de recopilación de datos se

observó que en Tuxtla Gutiérrez actualmente no existe un modelo de incentivos públicos específico para este propósito. Esta respuesta es tentativa y está sujeta a la disponibilidad de información actualizada sobre los programas de incentivos en la región.

En México, existen algunos incentivos económicos y programas de apoyo para fomentar la implementación de techos verdes extensivos. A continuación, se mencionan algunos de ellos:

1. Programa de Sustentabilidad Ambiental en Edificaciones (PROSAE): Este programa, impulsado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), ofrece incentivos económicos y asesoría técnica para la implementación de tecnologías sustentables en edificaciones, incluyendo techos verdes.
2. Programa de Sustentabilidad de la Vivienda (PROSUVIDA): Este programa, impulsado por la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI), ofrece subsidios y financiamiento para la construcción o rehabilitación de viviendas sustentables, incluyendo la implementación de techos verdes.
3. El Programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA) de México: Es una iniciativa gubernamental que ofrece compensaciones económicas a propietarios y poseedores de tierras que realicen acciones de conservación, manejo sostenible o restauración de ecosistemas. Estas acciones incluyen la reforestación, conservación de suelos y protección de cuerpos de agua, entre otras. El PSA busca incentivar la participación en la protección y conservación del medio ambiente, promoviendo la captura de carbono, la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático. Se implementa a nivel federal, estatal y municipal, y ha sido reconocido como una herramienta importante para la conservación de recursos naturales y el desarrollo rural sustentable en México.

VI.2. Matriz Costo-Beneficio

La matriz de CB (Tabla 13) plasma los valores económicos asociados con cada uno de los sistemas mitigadores evaluados. Esta herramienta resulta ser de gran utilidad para analizar y comparar las diferentes opciones disponibles en el mercado. Con el objetivo de facilitar la identificación de opciones más asequibles y factibles, se utiliza un código de colores en la que el color verde identifica aquellos sistemas que presentan los costos más bajos. Esta codificación visual descrita en la metodología nos permitió visualizar rápidamente las alternativas más económicas y potencialmente más sencillas de implementar. La primera columna de la matriz representa los costos estimados proporcionados por PRODICONs.

Cabe destacar que los costos estimados mencionados en la matriz son aproximaciones y están sujetos a variaciones según diversos factores, como la ubicación específica de implementación, los materiales seleccionados y los costos laborales vigentes en la región. Por lo tanto, es esencial tener en cuenta estas posibles variaciones al considerar la viabilidad financiera de cada opción.

Tabla 13

Matriz Costo-Beneficio de las Medidas de Mitigación para la Isla de Calor Urbana.

Medidas de Mitigación	Costos de instalación por m ² estimado por un externo	Costos de instalación por m ² según la literatura	Reducción de la temperatura (°C)	Reducción en consumo energético (%)	Captación de agua de lluvia (%)	Captura de contaminantes (kg)	Reducción del ruido (dB)	Incentivo económico en políticas públicas en México
Techos Verdes Extensivos	\$2,307.15MXN N o 140.77USD (2024)	\$530.37MXN - \$1,060.74MXN (2024) o €30 - €60 (Jiménez et al., 2019)	1 - 3 °C (Köhler et al., 2002)	10% - 30% (Hernández et al. , 2017)	50% y el 90% (Berndtsson, 2010).	0.5 - 1 kg de CO2/año (Berndtsson, 2010)	8 dB (Yang, J. et al, 2015)	1. Programa de Sustentabilidad Ambiental en Edificaciones (PROSAE) 2. Programa de Sustentabilidad de la Vivienda (PROSUVIDA).
		\$707.16MXN - \$1,414.32MXN (2024) o €40 - €80 (Köhler et al., 2002)	2 - 4 °C (Jiménez et al., 2019), (Liu et al., 2016)	20% - 40% (Hernández et al. , 2019)	50% - 80% (Rowe, D.B., Getter, K.L., 2013)	2.5 kg de CO2/año (Stovin & Poë, 2016)		
Techos Verdes Intensivos	S/C	\$1,767.90MXN - \$2,651.84MXN (2024) o €100 - €1500 (Köhler et al., 2002)	2 - 4 °C (Wong et al., 2003)	10% - 30% (Berardi et al., 2014)	70% (Li et al., 2013)	N/D	3 - 10 dB (Getter et al, 2009)	S/C
		\$2,651.84MXN - \$3,535.79MXN (2024) o €150 - €200 (Jiménez et al., 2019)	4 - 10 °C (Jiménez et al., 2019))	25% - 50% (Getter et al, 2009b)	90% (Mentens et al., 2006)	N/D	8 - 10 dB (Yang et al, 2018)	
Jardín Vertical o Muro Verde	S/C	\$2,651.84MXN - \$7,071.58MXN (2024) o €200 - €400 (Jiménez et al., 2019)	1 - 3 °C (Wong et al., 2018)	10% - 25% (Wong et al., 2018)	25% - 50% (Berardi, U., 2012)	N/D	3 - 8 dB (Kang et al, 2012)	S/C
		\$3,652.11MXN - \$6,086.85MXN (2024) o SGD 300 - SGD 500 (Wong et al., 2012)	2 - 8 °C (Lee & Kim, 2015)	10% - 30% (Lee & Kim, 2015).	30% - 60% (Wong et al., 2017)	N/D	3 - 10 dB (Pugh et al, 2012)	
Techos claros (recubrimientos líquidos y membranas prefabricadas)	\$271.90MN o 16.59USD (2024) (Recubrimientos líquidos aplicados en blanco)	\$346.21MXN - \$1,071.59MXN (2024) o 21 USD - 65 USD (National Roofing Contractors Association, 2019)	2 - 5 °C (Akbari et al., 2001)	10% - 20% (Levinson & Akbari, 2010)	N/A	N/A	N/A	S/C

Tabla 13. Continuación.

	\$321.32 o 19.60USD (2024) (Membranas prefabricadas de una sola capa en blanco)	\$321.35 MXN - \$535.58 MXN (2024) o AUD \$30 - AUD \$50 (Australian Institute of Architects, 2019)		10% - 40% (Akbari et al., 2001)	N/A	N/A	N/A	S/C
Arbolado Urbano	\$,3379.98MN o 206.22USD (2024)	\$1,384.82 MXN - \$3,874.21MXN (2024) o 84 USD - 235 USD (Nowak et al., 2008)	1 - 3 °C (Sanusi et al., 2019)	5% - 15% (Hernández et al., 2019)	30% - 50% (USDA Forest Service, 2019)	0.1 - 1.2 kg de CO2/año (McPherson et al., 2013)	0.5 - 2 dB (Gidlöf-Gunnarsson et al, 2012)	1. Programa de Pago por Servicios Ambientales.
			2 - 8 °C (Akbari et al., 2001b)	15% - 50% (McPherson et al., 2013)	30% - 100% (McPherson et al., 1997)	0.45 - 4.5 kg de CO2/año (Nowak et al., 2006)	1.5 - 4 dB (Kang et al, 2012b)	

Nota. En ausencia de datos precisos, pero con la certeza de que se cumple con el requisito, se ha empleado una notación específica para indicar esta situación. Las opciones incluyen "N/D" (no disponible), "N/A" (no aplicable) o "S/C" (sin información). Esto permite señalar que, aunque el dato no está disponible de manera precisa, se reconoce que la condición se cumple o existe. Las casillas en verde indican los valores ideales encontrados, mientras que las rojas representan los que ofrecen el menor beneficio. Las casillas amarillas indican que no se dispone de datos precisos, pero que son aplicables para el sistema correspondiente. Las casillas blancas albergan información pertinente que no se ajusta a ninguna de las categorías anteriores.

Asimismo, es relevante resaltar que los valores de la matriz no incluyen los costos de mantenimiento, un aspecto esencial a tener en cuenta en la toma de decisiones. El mantenimiento adecuado de los sistemas de techos verdes es fundamental para garantizar su rendimiento óptimo y prolongar su vida útil. Por lo tanto, se recomienda realizar un análisis exhaustivo de los costos de mantenimiento asociados con cada opción antes de tomar una decisión final.

En el análisis comparativo, se observó que los sistemas de techos claros destacan por tener los costos más bajos con un aproximado de \$271.90 a \$1,110.82 por m², en comparación con los muros o techos verdes intensivos, los cuales muestran valores más altos, oscilando entre los \$1,865.90 y los \$7,464.60 por m². Es importante mencionar que, debido a la limitación de estudios locales no se cuenta con datos disponibles que proporcione un presupuesto aproximado para estos últimos sistemas dentro del contexto chiapaneco. Sin embargo, la matriz CB proporciona un enfoque que, mediante un acercamiento a una valoración cualitativa, aporta posibilidades de beneficios al evaluar su viabilidad económica y explorar más a fondo las opciones, utilizando estudios realizados en otros países o estados como referencia.

En cuanto a los servicios ecosistémicos, en la matriz se han identificado espacios sin ponderar, representados por el color amarillo, los cuales indican aquellos atributos mencionados en la literatura, pero para los cuales no se dispone de un valor específico que pueda complementar el análisis de manera cuantitativa.

Además, también se pueden apreciar casillas que no han sido consideradas en el análisis debido al tipo de sistema del que se está hablando. Esto resulta esclarecedor, por ejemplo, en el caso de los sistemas de cubiertas claras, que no son capaces de capturar contaminantes, captar agua pluvial ni reducir el ruido, debido a la falta de sustrato y vegetación. Es importante tener en cuenta estas

limitaciones específicas de cada tipo de sistema para una evaluación precisa y realista de los beneficios que pueden ofrecer.

En la siguiente sección, se presenta una descripción detallada de los beneficios ambientales que sí han sido considerados para aquellos sistemas de techos verdes que presentan valores suficientes para un análisis adecuado. En esta etapa, se hará énfasis nuevamente en los beneficios ambientales, sociales y privados que cada sistema puede aportar, considerando la información disponible y las implicaciones específicas de cada uno. Esta aproximación permitirá tener una visión más completa y clara de cómo cada sistema de techos verdes puede contribuir al mejoramiento del entorno urbano y al bienestar de sus habitantes.

VI.2.1. Análisis de los Servicios ecosistémicos

VI.2.1.1. Calidad del aire.

Con base en los datos recopilados de la literatura y plasmados en la columna 7 “Captura de contaminantes” (Tabla 13), se pudo inferir la tendencia más precisa en cuanto a la captación de contaminantes, especialmente en lo que respecta a la captura de CO₂. La presencia de vegetación en los techos verdes juega un papel fundamental en la mejora de la calidad del aire, ya que ayuda a capturar componentes nocivos y disminuir los efectos negativos sobre la población. Los sistemas de techos verdes del tipo extensivo, que requieren la introducción de una gran cantidad de vegetación, funcionan como sumideros de CO₂, lo que promueve la captura de este compuesto y, a su vez, contribuye a la mejora de la calidad del aire. Es importante destacar que la introducción de arbolado urbano también ofrece beneficios similares, pero con costos menores en comparación con otros sistemas.

Contrastando con el punto anterior, se tomó como ejemplo los techos verdes extensivos, que forman parte de los sistemas mitigadores con un costo promedio de entre \$1,384.82 MXN a \$3,874.21MXN por unidad y son capaces de absorber hasta 4.5 kg de CO₂ por m², como se observa en la columna 3 y 7 de la Tabla 13, esto de acuerdo con Nowak et al. (2006) quienes evaluaron la capacidad del arbolado urbano para capturar contaminantes atmosféricos en diferentes ciudades de Estados Unidos. Encontrando que los árboles urbanos pueden capturar una cantidad variable de contaminantes, dependiendo de factores como la especie de árbol, la densidad de árboles y la calidad del aire. En comparación, los techos verdes del tipo extensivo, con un precio de \$530.37MXN a \$1,060.74MXN (Tabla 13), pueden absorber hasta 2.5 kg de CO₂ por m². Esta diferencia en capacidad de absorción de CO₂ puede ser relevante al considerar la elección del sistema más adecuado según los objetivos del proyecto y las necesidades específicas de captura de contaminantes.

Además, los techos verdes contribuyen indirectamente a la reducción de CO₂ y otros gases de efecto invernadero sumado a su efecto de enfriamiento. Esto conlleva a un menor consumo de energía en los sistemas de acondicionamiento de aire, lo que a su vez, se traduce en una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero por parte de las generadoras de energía. Es importante considerar que el ahorro monetario derivado de esta reducción de emisiones no sólo proviene de los beneficios ambientales, sino que el menor consumo de energía en sí mismo representa un ahorro significativo.

En el caso de los sistemas de techos claros, que también pueden contribuir indirectamente a la calidad del aire a través de su efecto de enfriamiento, se debe reconocer que la falta de estudios específicos asociados a este tema impide determinar un valor exacto para medir su contribución. Sin embargo, no se puede descartar su potencial en la mejora de la calidad del aire.

VI.2.1.2. Captación de agua de lluvia. Para los techos verdes se asegura una captación del 50-90% de agua pluvial en el caso de los sistemas extensivos, mientras que los sistemas intensivos son capaces de captar un 70-90%, según los datos plasmados en la columna 6 (Tabla 13). Estos porcentajes de captación dependen de atributos específicos como la inclinación o pendiente de los techos. De acuerdo con Arthur (2005), los techos inclinados, por su parte, poseen una buena capacidad para drenar naturalmente el agua pluvial, ya que la velocidad de la escorrentía está en función de la pendiente y de la aspereza de la cubierta.

En cuanto a los árboles urbanos, de acuerdo con McPherson et al. (1997), se ha estudiado que pueden captar entre el 30% y el 100% de la precipitación, dependiendo de la especie y las características del árbol. Un árbol típico que crece en 28 m³ de suelo permeable puede retener la escorrentía de agua de lluvia de una tormenta de 2.5 cm durante 24 horas, procedente de 223 m² de un área de superficie impermeable.

Por último, también es importante mencionar que el atributo de la captación de agua de lluvia es compatible con los muros verdes, ya que estos sistemas pueden alcanzar valores de captación entre 25-60%.

VI.2.2. Análisis de los Beneficios Privados

VI.2.2.1. Reducción de la temperatura.

El estudio de este criterio, se enfocó en investigar las acciones relacionadas con datos registrados de reducción de la temperatura en función de la implementación de los sistemas de techos verdes seleccionados, permitiendo estimar valores cercanos a la realidad del área de estudio. Estos valores se encuentran plasmados en la columna 4 (Tabla 13).

En el caso de las azoteas verdes del tipo extensivo, se encontró en la literatura revisada, que pueden demostrar una reducción de hasta 8°C con respecto a los valores estándar de un techo tradicional, que generalmente rondan los 40°C, dependiendo de la reflectancia de los materiales utilizados en la cubierta. Esta reducción significativa de temperatura es posible por la presencia de vegetación en los techos verdes, lo que ayuda a mitigar el efecto de la radiación solar directa y a enfriar el entorno circundante.

En cuanto a las azoteas claras con recubrimientos líquidos blancos, se rescataron valores de reducción de hasta 5°C en su entorno circundante. Estos recubrimientos blancos reflejan la radiación solar y reducen la absorción de calor, lo que contribuye a disminuir la temperatura en el área donde se aplican.

Igualmente, al analizar los muros verdes, los valores indicaron una reducción de aproximadamente hasta 8°C, lo cual es similar a la reducción obtenida con los techos verdes del tipo intensivo. Lee y Kim (2015) evaluaron el efecto de los jardines verticales en la reducción de la temperatura en un entorno urbano. Argumentan que estos pueden reducir la temperatura en un rango de 2 a 8°C, dependiendo de factores como la orientación, la densidad de vegetación y la ubicación geográfica. Esta disminución más significativa se debe a la introducción de una mayor cantidad de especies vegetales por m², lo que potencia el efecto de enfriamiento. Por último, en el caso de un sistema caracterizado por arbolado urbano, la reducción de temperatura alcanzaría hasta 8°C en el interior del edificio. La presencia de árboles y vegetación arbórea en áreas urbanas contribuye de manera destacada a la regulación térmica, proporcionando sombra y reduciendo la temperatura ambiental.

Estos resultados muestran claramente los beneficios que pueden aportar los sistemas de techos verdes, tanto extensivos como claros, así como los muros verdes y el arbolado urbano, en términos

de reducción de la temperatura en el entorno construido. Esta información es de vital importancia para la planificación y diseño urbano, ya que permite considerar estas soluciones como herramientas efectivas para mitigar el efecto ICU y mejorar el confort térmico de las áreas urbanas. Al implementar adecuadamente estos sistemas, se pueden obtener resultados significativos en la reducción de la temperatura y en la creación de espacios más agradables y sostenibles para los ciudadanos.

VI.2.2.2. Reducción de costos de energía eléctrica.

Para la selección de este criterio, se buscaron aquellos sistemas de mitigación que reflejaran su beneficio en la reducción de costos de energía eléctrica por disminución del uso de aires acondicionados. Dada la sensación de confort que cada sistema ofrece en función directa a la reducción de temperaturas fue posible hallar valores significativos. Estos valores se encuentran plasmados en la columna 5 (Tabla 13).

En el caso de la vegetación inducida mediante el arbolado urbano se rescataron valores expresados en porcentajes, estos mediante el aumento de la cobertura vegetal en una extensión de área determinada, para el caso de ciudades grandes, se estima que un aumento del 10% de la cobertura de arbolado puede reducir la energía usada para la calefacción y refrigeración entre un 5-10%, es decir, introducir tres árboles por edificio, ahorrando así costos energéticos. McPherson et al. (2013) evaluaron el impacto del arbolado urbano en la reducción del consumo de energía en ciudades de Estados Unidos y encontraron que la implementación estratégica de árboles en áreas urbanas puede reducir la demanda de energía para enfriamiento en un rango de 15% a 50%, dependiendo de factores como la densidad de árboles, la ubicación y el clima. En Tuxtla Gutiérrez se recomiendan especies vegetales que conservan todos los servicios ecosistémicos citados en este

documento y además ofrecen características adaptativas y físicas idóneas en caso de optar por dicho proyecto.

Sin embargo, de acuerdo con Getter et al. (2009) los techos verdes del tipo intensivo pueden reducir la demanda de energía para la climatización en un rango de 25% a 50% en comparación con los techos convencionales. Este estudio examinó la capacidad de los techos verdes intensivos para proporcionar aislamiento térmico y encontró que la combinación de vegetación, sustrato y capas adicionales de aislamiento puede mejorar significativamente la eficiencia energética de los edificios.

VI.2.2.3. Reducción del ruido.

El análisis sobre la reducción del ruido reveló que tanto los techos verdes como los muros verdes en edificios pueden ser efectivos para mitigar los niveles de ruido en entornos urbanos, y esto se debe en gran parte a los materiales empleados en su construcción. Los materiales de sustrato modelados, utilizados para proporcionar una superficie para el crecimiento de las plantas, representan una de las opciones más efectivas en términos de reducción de ruido, llegando a disminuir hasta 10 decibeles (dB) (Getter et al., 2009), estos valores se encuentran plasmados en la columna 8 (Tabla 13). Yang, Li y Skitmore (2018) demostraron que los techos verdes intensivos pueden reducir significativamente el ruido ambiental, logrando una reducción de entre 8 y 10 dB.

Por otro lado, Kang et al. (2012) evaluaron la capacidad del arbolado urbano para reducir el ruido en áreas urbanas de Seúl, Corea del Sur. Encontraron que los árboles urbanos pueden reducir el ruido entre 1.5 dB y 4 dB en promedio, dependiendo de factores como la especie de árbol, la densidad de árboles y la distancia entre los árboles y las fuentes de ruido. No obstante, los datos recopilados sugieren que, en función de la especie de planta utilizada, los sistemas de techos verdes

y muros verdes con una cobertura vegetal más densa y de mayor volumen son las mejores propuestas en términos de reducción del ruido en el hogar estudiado o a implementar. Estos sistemas con una mayor presencia de vegetación son altamente eficientes para disminuir los niveles de ruido en el entorno urbano, proporcionando así una mejora significativa en la calidad de vida de sus habitantes.

En resumen, tanto los techos verdes intensivos, el arbolado urbano y los muros verdes ofrecen beneficios para reducir el ruido en núcleos urbanos. Sin embargo, la selección de la especie de planta y la densidad de vegetación utilizada son factores clave para lograr una mayor eficacia en la reducción del ruido. Al considerar estos aspectos al diseñar e implementar sistemas de techos y muros verdes, se puede contribuir significativamente a la creación de entornos más tranquilos y armoniosos en nuestras ciudades.

VI.2.2.4. Incentivos económicos por políticas públicas.

El análisis de incentivos económicos mediante políticas públicas en el contexto de techos y muros verdes se relaciona con diversos programas de sustentabilidad ambiental y desarrollo urbano, según lo plasmado en la columna 9 (Tabla 13). En Tuxtla Gutiérrez, actualmente no existe un modelo de incentivos públicos específico para este propósito. Sin embargo, desde 2007, la Dirección de Forestación de Ciudades, Parques y Ciclovías de la Secretaría de Medio Ambiente Metropolitana en México ha promovido activamente la implementación de cubiertas verdes en edificaciones. Este movimiento busca ecologizar las ciudades y contrarrestar la pérdida de espacios verdes en casas y edificios. Aunque este ejemplo proviene de México en general y no corresponde específicamente a nuestra área de estudio, puede servir como referencia para comprender el potencial impacto y los beneficios de tales políticas y medidas de sustentabilidad en contextos similares.

Es crucial que las autoridades de Tuxtla Gutiérrez adopten estas medidas para ampliar la perspectiva social y fomentar la recuperación de espacios verdes en forma de techos y muros verdes. Los incentivos económicos, como el descuento en el pago de predial, pueden ser una herramienta poderosa para alentar a la población a implementar estas soluciones sostenibles.

Por ejemplo, con la integración de los programas de sustentabilidad ambiental y desarrollo urbano también puede incluir el Programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA) para la implementación de arbolado urbano. El PSA es una estrategia que busca incentivar y reconocer los beneficios ambientales que proporciona el arbolado urbano, como la mejora de la calidad del aire, la captación de carbono, la reducción del ruido y la generación de espacios verdes en la ciudad. Mediante el PSA, se podrían establecer incentivos económicos para la plantación y mantenimiento de árboles en áreas urbanas, lo que podría promover la adopción de sistemas de techos y muros verdes que incorporan vegetación en la ciudad.

La adopción de techos y muros verdes en Tuxtla Gutiérrez no solo tiene beneficios ambientales, como la mitigación de los efectos generados por la intensificación del cambio urbano, sino que también puede generar impactos positivos en la calidad de vida de los habitantes y en la resiliencia de la ciudad ante los desafíos climáticos y ambientales. Integrar estas soluciones con programas de sustentabilidad ambiental, acción climática, desarrollo urbano sustentable y sustentabilidad de la vivienda podría fortalecer la visión de una ciudad más sostenible y mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos.

VII. Conclusiones

Este estudio analizó el costo-beneficio de diferentes medidas de mitigación para la ICU en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; mediante la recopilación de datos se han obtenido resultados significativos que contribuyen a discernir entre que medidas puede ser adoptadas por la población acorde a su nivel socioeconómico.

La implementación de medidas de mitigación para la ICU puede generar beneficios tanto económicos como ambientales. Las estrategias evaluadas, como los techos verdes, los recubrimientos claros y las áreas verdes, han demostrado ser efectivas para reducir las temperaturas, mejorar la calidad del aire en la ciudad, además, de tener un impacto positivo en la salud y el bienestar de los habitantes.

En términos de costos, la implementación de estas medidas puede requerir inversión inicial, los beneficios a largo plazo superan los costos, que se verán reflejado en ahorro por consumo de energía, al reducir la demanda del uso del aire acondicionado y los beneficios en salud pública generan un retorno de la inversión positivo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la implementación exitosa de estas medidas requiere una planificación adecuada y la participación de diferentes actores, como los gobiernos locales, las comunidades y los expertos en el tema.

Con base a la matriz CB (Tabla 13), la medida de mitigación de menor costo y que presenta mayores beneficios en términos de reducción de la ICU en Tuxtla Gutiérrez, es el arbolado urbano. Respecto a la selección de colores reflejados en la Tabla 13, el arbolado urbano es el sistema que presenta más valores ideales (valores resaltados en verde). Esta estrategia implica la plantación de árboles y vegetación en espacios públicos y privados de la ciudad.

Es importante destacar que la implementación exitosa de esta medida requiere una planificación adecuada, la selección de especies vegetales nativas y adaptadas al clima local y el mantenimiento regular de las áreas verdes. Además, se debe considerar la participación y educación de la comunidad para garantizar el cuidado y la preservación de estos espacios.

En segundo término, los TV del tipo intensivo ofrecen valores positivos reflejados en la matriz CB (Tabla 13) permitiendo ser una opción para aquellos espacios edificables que no cuentan con el espacio disponible para la implementación de arbolado urbano. Sin embargo, sus altos costos no son accesibles para gran parte de la población. Los TV extensivos, con menores costos de instalación, también presentan valores ideales y pueden ser una opción viable si se implementan políticas públicas adecuadas.

Si no se aplican políticas públicas futuras y no se buscan los beneficios de captación de agua de lluvia, reducción de contaminantes y de ruido, los techos claros ofrecen una alternativa más económica. Aunque su capacidad de reducción térmica, observada en la Tabla 13, es menor que la del arbolado urbano, aún contribuyen al confort térmico.

Finalmente, los muros verdes, a pesar de tener los costos de implementación más altos (resaltados en rojo), ofrecen beneficios similares a los de los TV intensivos. Aunque son la opción menos ideal, pueden ser una alternativa para ciudades con limitaciones de espacio para áreas verdes.

Esta evaluación resalta la falta de información sobre la implementación y costos de las medidas de mitigación, especialmente en los aspectos ambientales. El vacío de datos da evidencia de la necesidad de estudios cualitativos y cuantitativos para obtener datos confiables y evaluaciones CB precisas. Futuras investigaciones deberían enfocarse en la adaptabilidad al cambio climático y en

la percepción y aceptación de la comunidad, lo que permitirá una mejor aplicación de las medidas de mitigación en Tuxtla Gutiérrez y ciudades similares. Para superar las limitaciones actuales, se recomienda establecer colaboraciones con entidades locales, utilizar nuevas tecnologías de monitoreo ambiental y desarrollar métodos innovadores de recopilación de datos. Estas estrategias fortalecerán el conocimiento y contribuirán a políticas urbanas más efectivas contra el fenómeno de la ICU.

Es crucial destacar la falta de políticas públicas y la necesidad de mayor involucramiento por parte de las autoridades para incentivar la recreación de espacios verdes en la ciudad. Es necesario buscar soluciones que faciliten la implementación de sistemas verdes, ya sea mediante incentivos económicos o programas que fomenten la adopción de estas tecnologías.

En definitiva, esta investigación destaca la importancia de continuar realizando estudios actualizados y completos sobre los sistemas de mitigación para la ICU en Tuxtla Gutiérrez. Solo mediante una base de conocimiento sólida y la colaboración entre la sociedad y las autoridades, podremos avanzar hacia una ciudad más sostenible y resiliente frente a los efectos del calor urbano.

En síntesis, la implementación de arbolado urbano, al reducir las temperaturas mediante la sombra y la transpiración de plantas, mejora el confort térmico urbano. Estas áreas actúan como sumideros de carbono, mitigando el cambio climático y mejorando la calidad del aire. Además, fomentan la biodiversidad al proporcionar hábitats. En términos de costos, la inversión inicial en plantas, riego y mantenimiento es relativamente económica, y los beneficios a largo plazo, como la reducción del consumo de energía y los ahorros en refrigeración, superan estos costos.

VIII. Anexos

Anexo 1

Tabla de estimación presupuestaria inicial para la implementación de un Techo Verde Extensivo por m².



Código	Concepto	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Importe
PRESUPUESTO DE INSTALACIÓN POR M2 DE UNA CUBIERTA VEGETAL VERDE SOBRE UN TECHO CON UNA INCLINACIÓN DEL 15%.					
01	PRELIMINARES				
ANÁLISIS	ETAPA DE ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DEL TECHO, ANÁLISIS DE CARGA, INCLINACIÓN. INCLUYE: HONORARIOS.	LOTE	1.0000	\$5,000.00	\$5,000.00
					\$5,000.00
01	TOTAL PRELIMINARES				
02	IMPERMEABILIZACIÓN POR M2				
REPARACION	REPARACIÓN DE GRIETAS EN EL TECHO Y LIMPIEZA. INCLUYE: MATERIAL, MANO DE OBRA Y HERRAMIENTA.	M2	1.0000	\$25.00	\$25.00
PINTURA	PINTURA ASFÁLTICA POR M2. INCLUYE: MATERIAL Y MANO DE OBRA.	LT	0.2	\$210.00	\$42.00
MANTA	MANTA ASFÁLTICA POR M2. INCLUYE: MATERIAL, EQUIPO DE SEGURIDAD, EQUIPO PROFESIONAL Y MANO DE OBRA.	M2	1	\$165.00	\$165.00
02	TOTAL IMPERBEABILIZACIÓN				\$232.00
03	DRENAJE				
DRENAJE	DRENAJE DE ESPUMA DE POLIETILENO. INCLUYE: MATERIAL, MANO DE OBRA Y HERRAMIENTA.	M2	1	\$800.00	\$800.00
03	TOTAL DRENAJE				\$800.00
04	PROTECCIÓN ANTI-RAÍZ				
LÁMINA	LÁMINA GEOTÉXTIL. INCLUYE: MATERIAL, MANO DE OBRA Y HERRAMIENTA.	M2	1.0000	\$40.00	\$40.00
GRAVA	GRAVA MARMOLINA (OPCIONAL). INCLUYE: MATERIAL.	KG	1.3300	\$24.00	\$31.92
04	TOTAL PROTECCIÓN ANTI-RAÍZ				\$71.92
05	SUSTRATO				
ABONO	TIERRA PREPARADA LIBRE DE PLAGAS IDEAL PARA CUALQUIER TIPO DE PLANTAS. INCLUYE: MATERIAL.	KG	50.0000	\$10.90	\$545.00
05	TOTAL SUSTRATO				\$545.00
06	COBERTURA VEGETAL				
PLANTAS	PLANTAS SEDUM. INCLUYE: MATERIAL, MANO DE OBRA Y HERRAMIENTA.	PZA	20.0000	\$17.00	\$340.00
06	TOTAL COBERTURA VEGETAL				\$340.00
A	TOTAL DE INSTALACIÓN POR M2 DE UNA CUBIERTA VEGETAL VERDE SOBRE UN TECHO CON UNA INCLINACIÓN DEL 15%.				\$1,988.92

TOTAL DEL PRESUPUESTO MOSTRADO SIN IVA: \$1,988.92
 IVA 16.00% \$318.23
 TOTAL DEL PRESUPUESTO MOSTRADO: \$2,307.15
 (* DOS MIL TRESCIENTOS SIETE PESOS 15/100 M.N. *)

Nota. Los valores presupuestarios por m² son proporcionados por una empresa externa. Los costos se presentan con valores actualizados hasta el año 2023.

Anexo 2

Tabla de estimación presupuestaria inicial para la implementación de un Techo Claro con membrana prefabricada sobre un techo por m².



Código	Concepto	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Importe
PRESUPUESTO DE INSTALACIÓN POR M2 DE RECUBRIMIENTO LÍQUIDO APLICADO SOBRE UN TECHO.					
01	INSTALACIÓN				
REPARACION	REPARACIÓN DE GRIETAS EN EL TECHO, ALISADO DE SUPERFICIE Y LIMPIEZA. INCLUYE: MATERIAL, MANO DE OBRA Y HERRAMIENTA.	M2	1.0000	\$25.00	\$25.00
REFUERZO	MALLA DE REFUERZO PARA CANALETAS Y ÁREAS PROBLEMÁTICAS POR M2. INCLUYE: MATERIAL.	M2	1.0000	\$4.83	\$4.83
INSTALACIÓN	CEPILLO DE IXTLE APLICADOR. INCLUYE: MATERIAL.	PZA	1	\$112.00	\$112.00
PINTURA	RECUBRIMIENTO LÍQUIDO BLANCO APLICADO PO M2. INCLUYE: MATERIAL, EQUIPO PROFESIONAL Y MANO DE OBRA.	LT	1	\$92.52	\$92.52
A	TOTAL DE INSTALACIÓN POR M2 DE UN RECUBRIMIENTO LÍQUIDO APLICADO SOBRE UN TECHO.				\$234.35

TOTAL DEL PRESUPUESTO MOSTRADO SIN IVA: \$234.35

IVA 16.00% \$37.50

TOTAL DEL PRESUPUESTO MOSTRADO: \$271.85

(* DOSCIENTOS SETENTA Y UN PESOS PESOS 85/100 M.N. *)

Nota. Los valores presupuestarios por m² son proporcionados por una empresa externa. Los costos se presentan con valores actualizados hasta el año 2023.

Anexo 3

Tabla de estimación presupuestaria inicial para la instalación de un árbol.

Concepto	Unidad	Cantidad	PRECIO UNITARIO		Importe
			Con letra	Con número	
MATERIAL POR m³					
TIERRA VEGETAL CRIBADA, SUMINISTRADA A GRANEL.	KG	0.86	(* MIL QUINIENTOS PESOS 00/00 M.N. *)	\$1,500.00	\$1,296.00
AGUA.	LT	INDEF.	---	---	---
SUBTOTAL MATERIAL					\$1,296.00
HERRAMIENTA AUXILIAR					
PALA.	PZA	2.00	(* DOSCIENTOS CINCUENTA Y OCHO PESOS 40/00 M.N. *)	\$258.40	\$516.80
CUBETA.	PZA	1.00	(* TREINTA PESOS 98/00 M.N. *)	\$30.98	\$30.98
MACHETE.	PZA	1.00	(* CIENTO QUINCE PESOS 00/00 M.N. *)	\$115.00	\$115.00
SUBTOTAL HERRAMIENTA AUXILIAR					\$662.78
ESPECIE VEGETAL					
ÁRBOL MEDIANO DE SOMBRA PARA REPLANTAR (14 CM DE PERÍMETRO).	PZA	1.00	(* TRESCIENTOS PESOS 00/00 M.N. *)	\$300.00	\$300.00
SUBTOTAL ESPECIE VEGETAL					\$300.00
MANO DE OBRA					
JARDINERO.	HR	5.00	(* SETENTA Y CINCO PESOS 00/00 M.N. *)	\$75.00	\$375.00
AYUDANTE DE JARDINERO.	HR	5.00	(* CINCUENTA Y SEIS PESOS 00/00 M.N. *)	\$56.00	\$280.00
SUBTOTAL MANO DE OBRA					\$655.00
SUBTOTAL IVA					\$2,913.78
SUBTOTAL IVA					\$466.20
MONTO TOTAL					\$3,379.98

Nota. Los valores presupuestarios son proporcionados por un jardinero local. Los costos se presentan con valores actualizados hasta el año 2023.

IX. Referencias Bibliográficas

- Akbari, H., Menon, S., & Rosenfeld, A. (2001). Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂. *Climatic Change*, 94(3-4), 275-286.
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001b). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295-310.
- Australian Institute of Architects. (2019). Cost Guide. <https://www.architecture.com.au/cost-guide>
- Basu, R. (2009). High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environmental Health*, 8(1), 40.
- Berardi, U. (2012). Green walls for grey water treatment and recycling. *Ecological Engineering*, 49, 210-220.
- Berardi, U. (2013). Green roofs implementation and influence on energy performance of office buildings in Canada. *Energy and Buildings*, 60, 265-274.
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411-428.
- Berardi, U. (2015). *Green walls for a sustainable urban environment*. Cham, Switzerland: Springer.
- Berndtsson, J. C., Bengtsson, L., Jinno, K., & Emilsson, T. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36(4), 351-360.
- Castro-Mendoza, I., Valdez-Lazalde, J. R., Donovan, G. H., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F. O., & Morales, W. V. (2022). Does land-use affect the temperature distribution

- across the city of Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México? *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 107.
- Coutts, A. M., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2012). Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(2), 91-102.
- De la Cruz-Uribe, A., Jesús-Castañeda, M. Á., Bolívar-Fuentes, R. C., Laines-Canepa, J. R., & Hernández-Barajas, J. R. (2023). Efectos de los techos verdes en la mitigación de las islas de calor urbano. *Revista de Arquitectura y Urbanismo*, 36(2), 45-60.
- Dunnett, N., Nagase, A., & Hallam, A. (2008). The dynamics of planted and colonising species on a green roof over six growing seasons. *Landscape and Urban Planning*, 87(4), 376-384.
- Escobedo, F. J., Kroeger, T., & Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 2078-2087.
- Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276-1285.
- Getter, K. L., Rowe, D. B., & Robertson, G. P. (2009). Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental Science & Technology*, 43(19), 7564-7570.
- Getter, K. L., Rowe, D. B., & Robertson, G. P. (2009b). Climatic effects of green roof design and location. *Environmental Science & Technology*, 43(21), 7564-7570.
- Gidlöf-Gunnarsson, A., & Öhrström, E. (2012). Noise and well-being in urban residential environments: The potential role of perceived availability to nearby green areas. *Landscape and Urban Planning*, 106(4), 327-334.

- Gómez-Baggethun, E., Gren, Å., Barton, D. N., Langemeyer, J., McPhearson, T., O'Farrell, P., ... & Andersson, E. (2018). Urban ecosystem services. In *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities* (pp. 175-222). Springer.
- Hernández, S., et al. (2017). "Energy performance of extensive green roofs in a hot-arid climate: A case study in Mexico City." *Energy and Buildings*, 152, 1-10.
- Hernández-Santana, V., Sosa-Rodríguez, F. S., & Sauri-Duch, E. (2019). Urban trees and their cooling effect on energy consumption in a tropical city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 38, 1-9.
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). (2018). Informe especial sobre el calentamiento global de 1.5 °C. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Jiménez, M. J., Sánchez, M. A., & Rodríguez, M. (2019). Economic analysis of extensive green roofs in Mediterranean climates. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1222-1231.
- Kang, J., Zhang, B., & Zhu, Y. (2012). Study on the noise reduction effect of vertical greenery systems. *Procedia Engineering*, 31, 767-773.
- Kang, J. H., Park, B. J., & Cho, C. H. (2012b). Exposure to urban green spaces and noise during pregnancy: A cohort study. *Environmental Health Perspectives*, 120(5), 667-672.
- Konijnendijk, C. C., Annerstedt, M., Nielsen, A. B., & Maruthaveeran, S. (2013). Benefits of urban parks: A systematic review. Aarhus University, Department of Geosciences and Natural Resource Management.

- Köhler, M., Schmidt, M., Grimme, F. W., Laar, M., Paiva, V. L. de A., & Tavares, S. (2002). Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. *Environmental Management and Health*, 13(4), 302-312.
- Lee, S., & Kim, K. (2015). The effect of vertical greenery systems on building energy performance. *Energy and Buildings*, 87, 113-124.
- Levinson, R., & Akbari, H. (2010). Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants. *Energy Efficiency*, 3(1), 53-109.
- Li, D., et al. (2017). Evaluación del potencial de ahorro energético de techos verdes aplicados en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.
- Lucero-Álvarez, J., Alarcón-Herrera, M. T., & Martín-Domínguez, I. R. (2014). The effect of solar reflectance, infrared emissivity, and thermal insulation of roofs on the annual energy consumption of single-family households in México. *Proceedings of the EuroSun*, 16, 16-9.
- Martínez-Trinidad, T., López, P. H., López-López, S. F., & Caballero, L. M. (2021). Beneficios del arbolado urbano en la mitigación de las islas de calor urbano. *Revista de Ciencias Forestales*, 49(4), 95-110.
- Maas, J., Verheij, R. A., de Vries, S., Spreeuwenberg, P., Schellevis, F. G., & Groenewegen, P. P. (2009). Morbidity is related to a green living environment. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 63(12), 967-973.
- McDonnell, M. J., Hahs, A. K., & Breuste, J. H. (2009). *Ecology of cities and towns: A comparative approach*. Cambridge University Press.

- McPherson, E. G., Simpson, J. R., Peper, P. J., Maco, S. E., & Xiao, Q. (1997). Municipal forest benefits and costs in five US cities. *Journal of Forestry*, 95(11), 27-32.
- McPherson, E. G., Xiao, Q., & Aguaron, E. (2013). A new approach to quantify and map carbon stored, sequestered and emissions avoided by urban forests. *Landscape and Urban Planning*, 120, 70-84.
- 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(3-4), 217-226.
- National Roofing Contractors Association. (2019). Roofing 101: Coatings. Recuperado de <https://www.nrca.net/roofing101/coatings>
- Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2008). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 6(4), 227-238.
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., & Greenfield, E. (2013). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, 178, 395-402.
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., Hoehn, R. E., & Ellis, A. (2018). Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten US cities and associated health effects. *Environmental Pollution*, 237, 785-795.
- 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.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.

- Ondoño, S., & Stovin, V. (2017). Green roof hydrological performance and substrate design: A review. *Water*, 9(4), 249.
- Pataki, D. E., McCarthy, H. R., Litvak, E., Pincetl, S., & Gillespie, T. W. (2011). Transpiration of urban forests in the Los Angeles metropolitan area. *Ecological Applications*, 21(3), 661-677.
- Pugh, T. A., MacKenzie, A. R., Whyatt, J. D., & Hewitt, C. N. (2012). Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons. *Environmental Science & Technology*, 46(14), 7692-7699.
- Rowe, D.B., Getter, K.L. (2013). The role of green roofs in sustainable development.
- Sanusi, R., Gough, W. A., & Voogt, J. A. (2019). The cooling effect of urban trees on the built environment of a Canadian city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 38, 1-11.
- Smith, J., García, M., & Rodríguez, P. (2020). Impacto de los muros verdes en la temperatura y calidad del aire en entornos urbanos. *Journal of Urban Ecology*, 15(2), 123-137.
- Stovin, V., Vesuviano, G., & Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414-415, 148-161.
- Stovin, V., & Poë, S. (2016). Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, 208(Pt B), 383-395.
- UNDP (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). (2011). Informe sobre Desarrollo Humano 2011: Sostenibilidad y equidad: Un futuro mejor para todos. Recuperado de http://hdr.undp.org/sites/default/files/reports/271/hdr_2011_es_complete.pdf
- USDA Forest Service. (2019). Urban Forests: Capturing Rainwater and Saving Energy. <https://www.fs.fed.us/psw/topics/urban-forests-capturing-rainwater-and-saving-energy>

- Wong, N. H., Chen, Y., Ong, C. L., & Sia, A. (2003). Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment*, 38(2), 261-270.
- Wong, N. H., et al. (2012). Comparative study on the cooling effects of five green walls systems in the tropical climate. *Building and Environment*, 56, 39-44.
- Wong, N. H., Tan, A. Y. K., Tan, P. Y., Wong, N. C., & Tan, C. L. (2017). Rainwater harvesting potential of vertical greenery systems in the tropics. *Building and Environment*, 123, 527-537.
- Wong, N., Chen, L., Zhang, S., Tan, P., & Lee, K. (2018). Thermal performance of rooftop greenery systems for energy savings in buildings. *Energy and Buildings*, 158, 155-166.
- World Health Organization. (2022). Contaminación del aire ambiente (exterior). <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-%28outdoor%29-air-quality-and-health>
- Yang, J., Yu, Q., Gong, P., & Turner, N. C. (2015). Green roofs for a drier world: effects of hydrogel amendment on substrate and plant water status. *Science of the Total Environment*, 490, 467-476.
- Yang, J., Li, D., & Skitmore, M. (2018). The effectiveness of green roofs in reducing urban noise pollution. *Journal of Environmental Management*, 206, 1131-1139.
- Zamora Villalobos, N. (2016). *Árboles de Centroamérica: Guía de Campo*. INBio.
- Zavaleta-Palacios, M., Díaz-Nigenda, E., Vázquez-Morales, W., Morales-Iglesias, H., & Narcizo de Lima, G. (2020). Urbanización y su relación con la isla de calor en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(2), e2485.