

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano
MAESTRÍA EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES



Sistema de Naturación de Azoteas para Aportar a los Servicios Ecosistémicos y a la Eficiencia Energética en la Vivienda en Tijuana

Trabajo recepcional que para obtener el grado de
Maestra en Proyectos y Edificación Sustentables

Presenta: **ING. DANIELA LIZETTE MEDINA GONZÁLEZ**

Tutora **MTRA. SANDYBEL CRISTINA NOLASCO DELGADO**

Cotutor **MTRO. ÓSCAR HUMBERTO CASTRO MERCADO**

Tlaquepaque, Jalisco. 10 de julio de 2023.

Agradecimientos

Es con gratitud que deseo reconocer a todos aquellos que me han apoyado durante el proceso de finalizar mi trabajo y obtener mi grado de maestría.

Agradezco al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por brindarme la oportunidad y los recursos para continuar mis estudios y completar este trabajo.

Quisiera expresar mi agradecimiento a mi tutora, la Mtra. Sandybel Nolasco, y a mi cotutor, el Mtro. Óscar Castro, quienes, con sus valiosas observaciones y guía constante, han enriquecido el desarrollo de esta investigación.

Asimismo, reconozco el importante aporte de todos los profesores de maestría que he tenido, cuya enseñanza ha ampliado mi visión sobre la sustentabilidad y ha impactado profundamente en mi formación académica.

A mi madre, padre y hermano, les agradezco por su apoyo y la inspiración que me han brindado durante este desafío que ha sido la maestría. Su confianza en mí ha sido un elemento crucial en mi crecimiento personal y profesional.

Por último, pero no menos importante, a mis amistades Leobardo, Ana Andrea, Ariana, Joel, Natalia y Andrea. Agradezco por su motivación constante y la alegría que me han brindado durante este proceso. Cada momento compartido ha fortalecido mi determinación en la finalización de este trabajo.

Resumen

La ciudad de Tijuana tuvo un crecimiento poblacional significativo en la última década. Al mismo tiempo hubo un aumento en la construcción y ocupación de viviendas. La expansión acelerada y desordenada de la ciudad ha ocasionado que no se destinen suficientes áreas verdes de calidad para los habitantes. Al mismo tiempo, se encuentra en una crisis hídrica que limita el mantenimiento de los espacios verdes actuales.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una propuesta viable de techos verdes para la vivienda de Tijuana que contribuya con el ahorro energético y que aporte a los servicios ecosistémicos de la región. En primer lugar, se investigan diseños de sistemas que mejoren el confort térmico dentro de viviendas en climas similares a los de Tijuana, así como la vegetación ideal para utilizarse en la zona. A partir de ello, este trabajo lleva a cabo una evaluación en términos energéticos del impacto en la vivienda. En el trabajo también se examina la elección de un diseño que se puede replicar de forma sencilla y requiera un bajo mantenimiento. En los instrumentos metodológicos implementados se involucró a la sociedad por medio de cuestionarios y encuestas para determinar características deseadas en el sistema y las principales limitantes en la implementación de techos verdes.

La solución obtenida es el diseño de una propuesta sustentable para naturar azoteas en la ciudad que tenga los mayores beneficios para los habitantes. La propuesta tiene la característica de tener un espesor de sustrato que funciona para el crecimiento óptimo de la vegetación y que genera beneficios como una estrategia pasiva de aislamiento térmico. En la solución se presenta la selección de especies para vegetar la azotea que requieren poco mantenimiento y aporta servicios ecosistémicos a la vivienda y a la ciudad.

Palabras claves: Techos verdes, servicios ecosistémicos, eficiencia energética, vivienda.

Abstract

The city of Tijuana had significant population growth in the last decade, at the same time there was an increase in housing construction and occupation. The accelerated and disorderly expansion of the city has caused not enough quality green areas to be allocated for the inhabitants. At the same time, Tijuana is in a water crisis, a problem that limits the maintenance of current green spaces.

The objective of this work is to develop a viable proposal for green roofs for homes in Tijuana that demonstrates the energy savings and ecosystem services they provide. Firstly, the work investigates system designs that resolve thermal comfort in climates similar to those of Tijuana, as well as the ideal vegetation to be used in the area. Based on the research carried out, an evaluation in energy terms of the impact on housing is carried out. The work also examines the choice of a design that can be easily replicated and requires low maintenance. In the methodological instruments implemented, society is involved through questionnaires and surveys to determine desired characteristics in the system and main limitations for the implementation of green roofs.

The solution obtained is the design of a sustainable proposal for greening rooftops in the city, delivering maximum benefits to its residents. The proposal features a substrate thickness conducive to optimal vegetation growth, harnessing the benefits of this passive strategy. The solution includes the selection of low-maintenance plant species that provide ecosystem services to both housing and the city.

Keywords: Green roofs, ecosystem services, energy efficiency, housing.

Índice

1. Planteamiento del tema	7
1.1 Delimitación del objeto de innovación	7
1.2 Descripción de la situación-problema.....	8
1.3 Importancia del proyecto	11
2. Encuadre contextual y marco conceptual	13
2.1 Antecedentes empíricos del tema.....	13
2.1.1 Tipos de superficies vegetadas.....	13
2.1.2 Vegetación para techos verdes.....	19
2.1.3 Ejemplos análogos	27
2.1.4 Superficies vegetadas en Tijuana.....	32
2.1.5 Financiamiento para ecotecnias	34
2.1.6 Servicios ecosistémicos de un techo verde	36
2.2 Referencias conceptuales del tema	39
2.2.1 Eficiencia energética.....	39
2.2.2 Relación entre conceptos	40
3. Diseño metodológico	41
3.1 Supuesto de trabajo.....	41
3.2 Preguntas generadoras	41
3.3 Objetivos.....	42
3.4 Elección metodológica.....	42
3.5 Selección de técnicas y diseño de instrumentos.....	43
3.5.1 Aplicación de cuestionarios	43
3.5.2 Observación directa	45
3.5.3 Revisión documental para la selección del sistema	46
3.5.4 Entrevistas semiestructuradas	47
3.5.5 Investigación para la selección de la vegetación.....	48
3.5.6 Diseño experimental	49
3.6 Cuadro de operacionalización de variables.....	52
3.7 Ruta crítica de trabajo	54
4. Análisis, desarrollo de la propuesta y resultados	55
4.1 Síntesis interpretativa de los datos analizados	55
4.1.1 Cuestionarios	55

4.1.2 Observación directa	61
4.1.3 Entrevistas	72
4.1.4 Análisis de vegetación ideal para techos verdes en Tijuana	75
4.1.5 Análisis de sustrato para retención de humedad	79
4.2 Hallazgos aprovechables.....	85
4.3 Diseño aplicativo de la solución	86
4.3.1 Selección de sistema constructivo	86
4.3.2 Selección de especies.....	88
4.3.3 Selección de sustrato.....	89
4.4 Factibilidad y validación.....	89
4.4.1 Validación de costos del techo verde.....	89
4.4.2 Validación de servicios ecosistémicos.....	98
4.4.3 Validación de eficiencia energética	99
5. Conclusiones y recomendaciones.....	103
5.1 Conclusiones.....	103
5.2 Recomendaciones y propuestas de investigaciones futuras	107
Referencias	110
Anexos.....	117
Anexo 1 – Formulario de cuestionario.....	117
Anexo 2 – Formulario de observación directa	121
Tabla para diversidad de plantas	121
Anexo 3 - Gráficos del cuestionario	121
Anexo 4 - Cartas de vinculación.....	129

1. Planteamiento del tema

1.1 Delimitación del objeto de innovación

El trabajo de obtención de grado (TOG) propone el desarrollo de un sistema de naturación para la vivienda en Tijuana que sirva como aislamiento para impedir la incidencia directa de la radiación solar en los techos, y disminuir el consumo energético que resulta del uso de climatización artificial.

Este trabajo se propone también aumentar la presencia de áreas verdes en los techos de la ciudad de Tijuana. A través de la creación de micro ecosistemas en las azoteas, se busca: I) mitigar el efecto isla de calor urbano, II) proporcionar un hábitat para la biodiversidad, III) abordar la falta de espacios verdes en el municipio, así como la pérdida de flora nativa, y IV) mitigar los impactos del cambio climático en el confort de las personas.

El objeto de innovación de este trabajo se ubica, de acuerdo con la Clasificación Mexicana de Programas de Estudio por Campos de Formación Académica, dentro del campo de conocimiento 5 - Ingeniería, manufacturas y construcción, campo específico 53 - Arquitectura y construcción, detalle 531 - Arquitectura y urbanismo, debido a que este campo abarca la temática de “arquitectura bioclimática” que incluye el uso de estrategias pasivas. De acuerdo con la Clasificación Barros-Sierra, el objeto de innovación de este trabajo se ubica en el campo disciplinar 330000 Ciencias de tecnología, en la disciplina 330500 Tecnología de la construcción, y la subdisciplina 330501 Diseño arquitectónico, que abarca la intervención del diseño con estrategias constructivas que abonan a la sustentabilidad.

Este sistema de naturación fue diseñado para vivienda horizontal unifamiliar, con la visión de que sea sencilla, asequible y aporte beneficios estéticos, económicos y ambientales.

La propuesta está orientada en hacer una aportación a los todos los tipos de servicios ecosistémicos que puede proveer la vegetación en la vivienda: aprovisionamiento, culturales, de regulación y de soporte. Busca también ser una estrategia pasiva eficiente en el aislamiento

térmico de la vivienda, por lo que, el objeto a innovar en este trabajo son las estrategias constructivas de climatización pasiva en la vivienda.

1.2 Descripción de la situación-problema

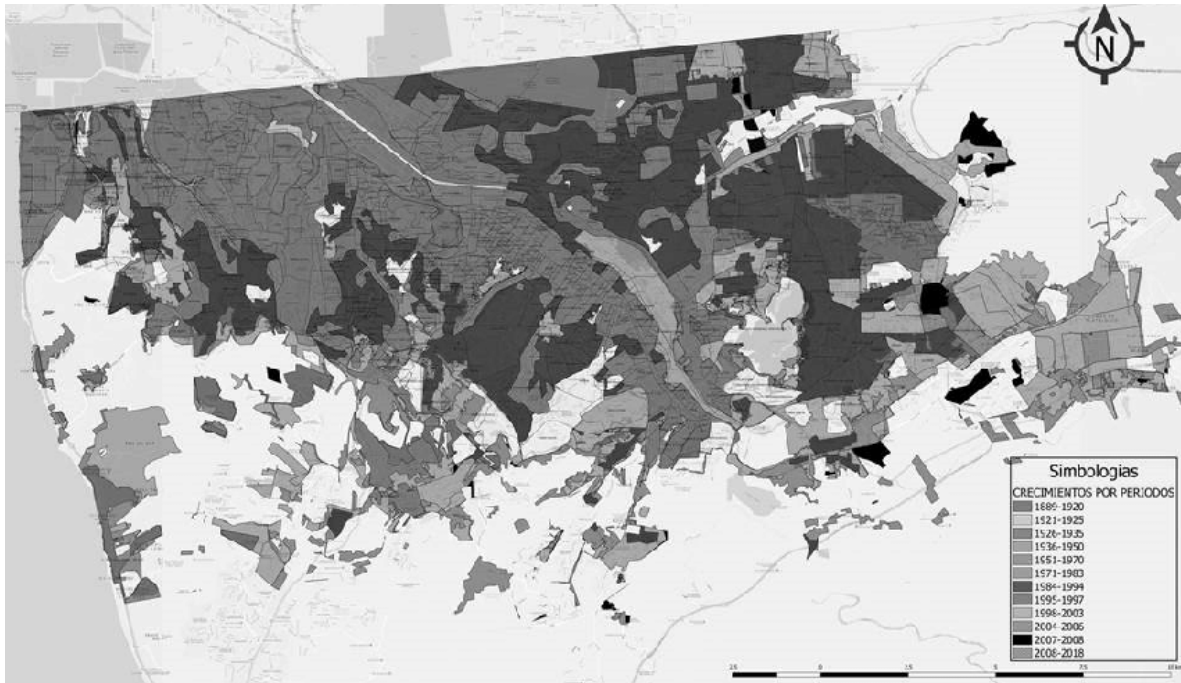
El municipio de Tijuana ha tenido un incremento en la construcción de viviendas debido a su crecimiento poblacional. De acuerdo con el INEGI (2020), el municipio cuenta con una población de 1,922,523 habitantes, lo que lo hace el más poblado del país. Además, de acuerdo con las estadísticas del INEGI, el total de viviendas particulares habitadas en Tijuana aumentó de 475,341 en 2015 a 576,708 en 2020. Este incremento es significativo, sobre todo si se considera que en 2010 había apenas 420,544 viviendas, por lo que el crecimiento de 2015 a 2020 fue de casi el doble que el experimentado de 2010 a 2015.

El diseño arquitectónico y los sistemas constructivos que se suelen implementar en estas nuevas viviendas de Tijuana no son los adecuados para lograr un confort térmico dentro de las mismas. Por otro lado, el aumento de casas ocupa espacios verdes que anteriormente estaban cubiertas con vegetación, por lo que hay un decremento en las áreas verdes por habitante.

La propuesta aquí desarrollada busca ser equitativa para la población y sitios de la ciudad, pues está concebida para ser asequible y que pueda ser aplicada en sectores que actualmente cuentan con recursos económicos limitados.

Figura 1.1

Crecimiento urbano de Tijuana



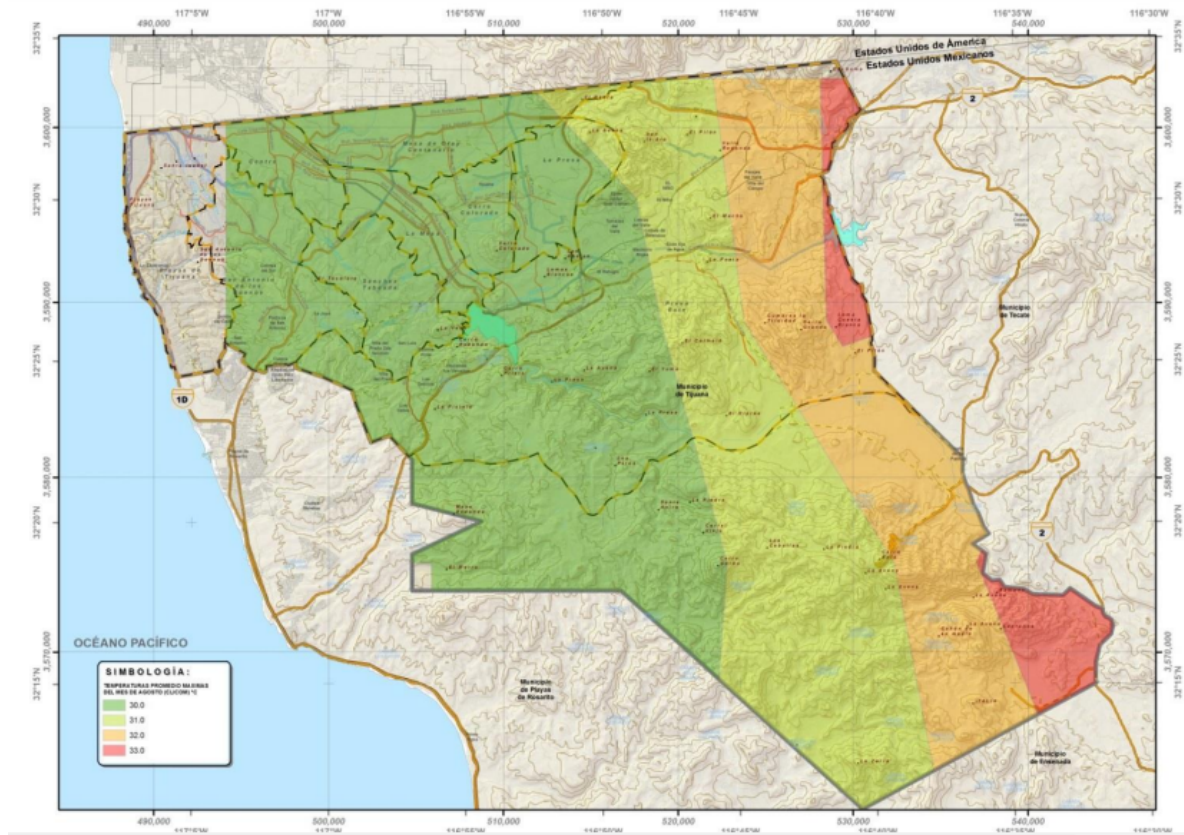
Nota: Recuperada de Carmona (2021) en *El habitar contemporáneo desde las unidades residenciales en América Latina* (p. 60)

En la Figura 1.1 muestra la expansión urbana de Tijuana durante el siglo XX e inicios del siglo XXI. Esta expansión ha tenido como consecuencia el aumento en la construcción de viviendas tanto vertical como horizontal, en las zonas céntricas y principales de la ciudad, y en las zonas periféricas. Sin embargo, la calidad del entorno urbano no es equitativa en todas las zonas. Ordóñez (2020) señala que en el municipio hay alrededor del 25% de las manzanas a las que les faltan árboles en sus vialidades, que en el otro extremo un poco más del 26% tienen en sus banquetas y vialidades árboles frondosos o palmeras.

Lo anterior sugiere que existe un déficit con respecto al entorno urbano y el acceso de áreas verdes que tienen unas viviendas comparadas con otras. Esto tiene una repercusión en el ambiente, puesto que no hay áreas verdes suficientes para lograr una mejora significativa de la calidad del aire. Del mismo modo afecta en la regulación de la temperatura que se percibe por los usuarios dentro y fuera de las viviendas.

Figura 1.2

Mapa de temperaturas máximas (promedio) en el mes de julio en Tijuana.



Nota: Recuperado de IMPLAN (2014) en Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Tijuana (p.72)

Otra manera de dimensionar la problemática es a través de la cantidad de metros cuadrados de área verde por habitante, Huizar (2012) afirma que en 2012 en Tijuana habían 0.86 m² de áreas verdes por habitante y este número disminuyó a 0.44 m² en el 2019, de acuerdo con lo que señala el IMPLAN (2014).

Al comparar este dato con otras ciudades como Curitiba, Brasil, que tiene 51.5m², Madrid, España, con 15.78m² o Monterrey, México, con 6.72m², es evidente que en Tijuana existe un déficit de áreas verdes por habitante. Peor aún, los datos históricos muestran que con el tiempo este indicador va empeorando en la ciudad, y la población se ve afectada en términos sociales, ambientales y de salud.

Por otro lado, es importante mencionar que las problemáticas ambientales se perciben diferente según el nivel de marginación del sitio. De acuerdo con lo que menciona Reyes (2017) el contexto natural, social y económico que se tiene en el municipio es distinto según la colonia, de ahí que la manera de abordar la falta de áreas verdes sea distinta para cada zona.

El modelo de vivienda horizontal unifamiliar es el que ha predominado históricamente en la ciudad de Tijuana. Por este motivo, se seleccionaron dos colonias en las que predomina este modelo de vivienda para evaluar como parte del presente trabajo: El Lago y Santa Fe. Ambas son catalogadas de nivel medio y prototipo de fraccionamientos que se encuentran replicados en otras partes de la ciudad.

1.3 Importancia del proyecto

Este Trabajo de Obtención de Grado busca contribuir a cumplir las metas adquiridas por nuestro país en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS), en específico los siguientes:

- ODS 11 - Ciudades y comunidades sustentables, que busca lograr que Tijuana sea inclusiva, sostenible y resiliente a través de transformar los espacios urbanos y garantizar que todas las personas tengan acceso a viviendas seguras. También se tiene como meta el acceso universal a zonas verdes.
- ODS 13 - Acción por el clima: porque se implementan estrategias que apoyan a la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) y la adaptación de los efectos del cambio climático.
- ODS 15 - Vida de ecosistemas terrestres: debido a que se busca proteger y reestablecer el ecosistema de Tijuana y combatir la pérdida de biodiversidad como un factor clave en la planificación.

De la misma manera, en el nivel nacional este trabajo se alinea con los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACE) de Vivienda y Energía y Cambio Climático. En el primero porque

es una respuesta a los problemas nacionales relacionados con la vivienda y al hábitat sustentable. Por otro lado, el segundo PRONACE tiene en sus elementos las estrategias para la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático. Este programa considera las afectaciones de la calidad del aire y busca que la energía tenga un uso final sustentable.

Uno de los argumentos para desarrollar este proyecto en Tijuana Está relacionado con lo expuesto por Rosales, E. (2019), quien menciona que Aaron Victorio, el director del Consejo de Desarrollo de Tijuana, señaló que se tiene más de un 90% de déficit de área verde en el municipio. Rosales remarca que, aunque “en los últimos diez años, la superficie verde aumentó en un 33%, es mínima en proporción al aumento poblacional ". En esta lógica, los techos verdes se presentan como una oportunidad para aumentar considerablemente áreas vegetadas dentro en la ciudad, en la medida que sea posible aprovechar la misma superficie que abarca una casa-habitación.

Es importante remarcar que esta propuesta busca aportar a la sustentabilidad en virtud de que sus potenciales repercusiones en el confort térmico de la vivienda tienen el potencial de mejorar el ahorro energético y, en consecuencia, económico de los hogares.

La propuesta se alinea con las estrategias de certificación de edificación sustentable, lo que la hace más atractiva para los desarrolladores inmobiliarios. Estas certificaciones destacan los beneficios de utilizar techos verdes, lo que añade un valor adicional a la propuesta.

Además, beneficia a la población al desarrollar una propuesta asequible que alcanza a un público más amplio, lo que contribuye en parte a resolver la problemática de la ciudad. Al colaborar con los desarrolladores desde el diseño arquitectónico, se facilita la implementación de estos sistemas.

2. Encuadre contextual y marco conceptual

2.1 Antecedentes empíricos del tema

Las superficies vegetadas nacen de la necesidad de contar con aislamiento térmico en países de Europa y Norteamérica debido a las bajas temperaturas, donde esta técnica permite conservar un confort térmico dentro de las edificaciones.

De acuerdo con Ramos (s.f.) tanto Estados Unidos como Canadá han hecho uso de una tecnología que probablemente procedía de Europa y que consiste en la construcción de muros de entre 60 y 90 cm de ancho con terrones de césped de 10 cm de espesor. Otro ejemplo es el techo tradicional de pasto en Escandinavia que cuenta con una capa gruesa de unos 20 cm de terrones de césped.

Los anteriores son algunos de los sistemas que se utilizaron con anterioridad, pero el paso del tiempo ha permitido un mayor desarrollo de esta tecnología para hacerla más eficiente, que contribuye con la preservación del medio ambiente y otorga beneficios a la salud de quienes hacen uso del edificio.

2.1.1 Tipos de superficies vegetadas

De acuerdo con Scherer (2018), las envolventes vegetadas se pueden definir como cerramientos, revestimientos o elementos constructivos alternativos a los convencionales, que tienen la vegetación como componente principal, junto con otras capas o soportes para su fijación o desarrollo. Actualmente existen diferentes técnicas para la implementación de cubiertas vivas y jardines verticales, con particularidades que inciden en sus beneficios para el entorno construido, además de contar con un mayor o menor costo en ejecución y mantenimiento.

A continuación, se mencionan los diferentes sistemas que existen para vegetar la envolvente y así ver la gama de lo que se puede implementar.

Sistema tradicional o techos verdes: consiste en un sistema que permite plantar en la quinta fachada o cubierta. Esto significa que se adecúan directamente sobre el techo los elementos (véase Figura 2.1) necesarios para facilitar la aplicación de vegetación. Los elementos son los siguientes de acuerdo con Singular Green (2022): impermeabilización, drenante, retenedora, filtrante, sustrato, protección del sustrato y la plantación.

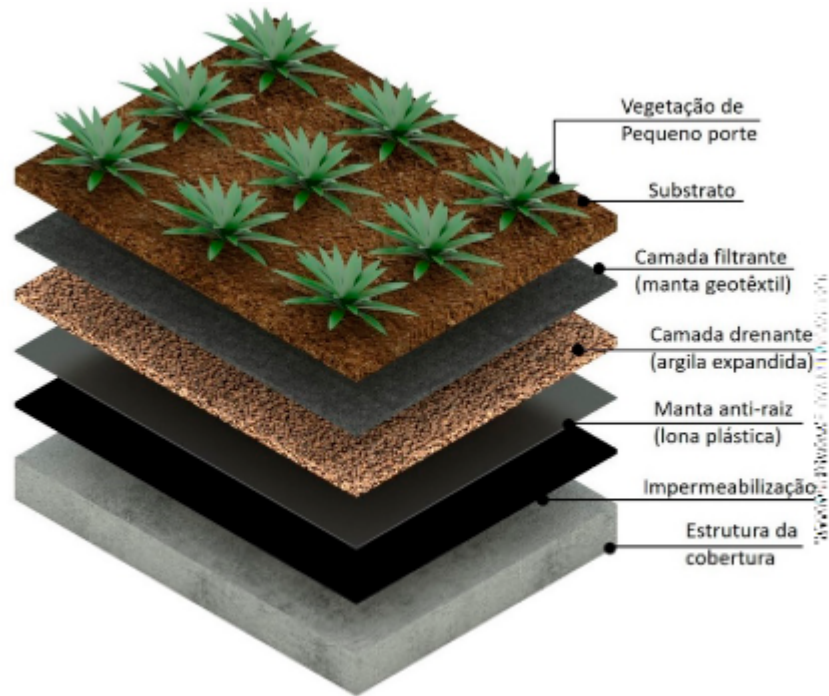
Muros verdes: presentan elementos similares a los de los techos verdes. Se evalúan los muros modulares y los continuos, los cuales se pueden observar en las Figuras 2.2 y 2.3 respectivamente. En el caso del continuo se agrega un elemento de irrigación y un tanque para reutilización del agua de riego. El modular también tiene estos elementos, pero la cama geotextil, el sistema estructural y de irrigación se dividen por módulo.

Toldos vegetales: de acuerdo con Singular Green (2022) son sistemas ligeros y fáciles de instalar. Esto se debe a su adaptabilidad. La geotextil *Leaf Skin* tiene una mezcla de semillas para que crezca en un sustrato específico. Tiene un punto de desagüe que funciona por la gravedad de la inclinación del toldo.

Sistema modular: de la misma manera en las cubiertas se puede implementar un sistema modular que, según Cortes (2019), evita el contacto directo con el techo. También tiene beneficios en su instalación y reparación. Todos los elementos se encuentran dentro del módulo y hay de diferentes tamaños y materiales.

Figura 2.1

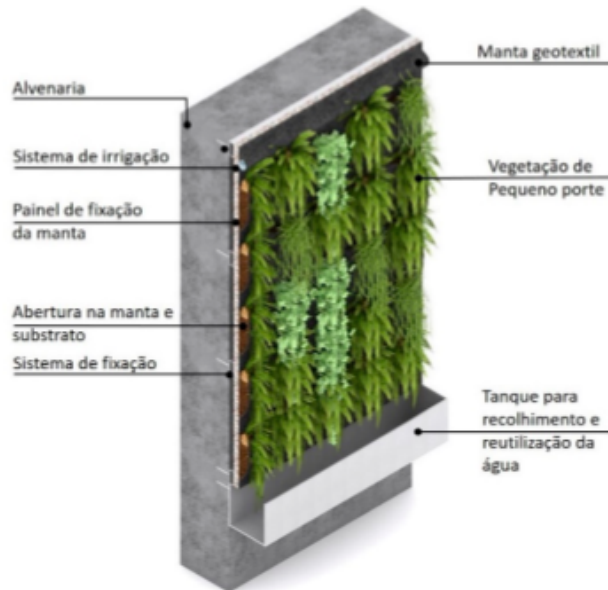
Sistema contínuo de telhado verde e suas camadas



Nota: Scherer *et al.* (2018). Green envelopes applied in buildings: benefits and techniques. p. 89

Figura 2.2

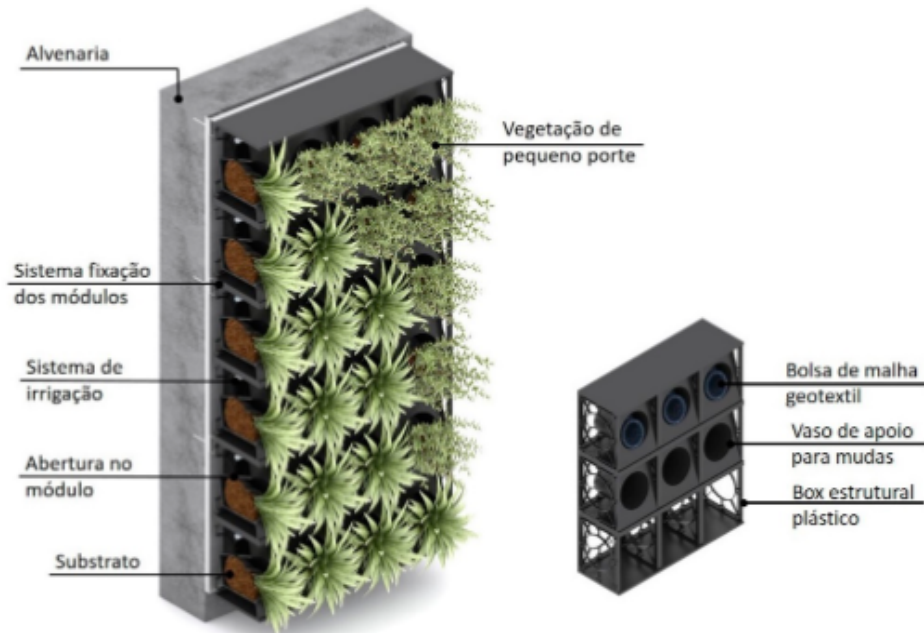
Elementos de um muro verde contínuo



Nota: Tomado de Green envelopes applied in buildings: benefits and techniques (p.93), por Scherer *et al.*, 2018.

Figura 2.3

Elementos de un muro verde modular



Nota: Tomado de Green envelopes applied in buildings: benefits and techniques (p.94), por Scherer *et al*, 2018.

Por sus características, las superficies vegetadas requieren planeación, por lo que es importante considerar estos aspectos al momento de intervenir la edificación. En el caso del sistema tradicional, Minke (2010) establece que la inclinación del techo verde es decisiva e influye en la elección de la vegetación. Por lo tanto, él estipula que se requiere una inclinación mínima del 5% para que no sea necesario instalar un drenaje especial.

Respecto de las cargas, Minke (2010) menciona que se consideran cargas para el dimensionamiento. Por lo tanto, es necesario conocer el peso total del techo, considerando que el sistema esté saturado de agua y también tomando en cuenta el peso de la vegetación.

En relación con la protección de la estructura y el drenaje, se hace énfasis en dos componentes de construcción: protección del techo y la capa de drenaje. El primero protege la azotea para que no se vea afectada por las raíces. Para ello existen membranas de polietileno que previenen afectaciones a la estructura. Es importante mencionar que esto también se puede anticipar desde la elección de los cultivos.

Para el segundo componente, Minke (2010) estipula que una capa de drenaje tiene el objetivo de almacenar agua y redirigir el excedente. Normalmente se utilizan materiales livianos y porosos, esto en caso de techos planos o de poca inclinación.

Un sistema modular de techo verde tiene la ventaja de ser versátil con respecto a los materiales con los que puede ser fabricado. Todos los sistemas presentados en la Tabla 2.1 son modulares, lo que facilita su instalación y mantenimiento. A continuación, se ofrece un panorama general de estos sistemas disponibles en el mercado mexicano.

Los sistemas modulares varían en sus materiales y diseños. El Ecotelhado, fabricado con material EVA, se caracteriza por su diseño de charola dividida en una cuadrícula de 8 espacios, ideal para albergar diversas plantas y sustratos. Por otro lado, sistemas como Green roof outfitters, Green grid roofs y LiveRoof optan por el uso de plástico reciclado en sus módulos.

Es importante mencionar que los toldos vegetales, descritos previamente, también se incluyen en esta comparativa por sus características únicas. Un sistema que destaca por su innovación es el Modular Kasten, que utiliza la impresión 3D en polipropileno para crear sus módulos.

En la Tabla 2.1 se presentan características específicas de estos sistemas modulares, incluyendo el peso saturado, el espesor del sustrato y el costo por metro cuadrado, lo que permite una comparación detallada de las opciones disponibles.

Para este proyecto se seleccionaron los sistemas de azoteas verdes modulares, dado que son más sencillos de instalar. También se pueden trasladar en caso de que se requiera sin perder la inversión. Por esta razón, la Tabla 2.1 se actualizó con los valores vigentes en el año 2022 para comparar las características de cada uno y sus costos.

Tabla 2.1*Comparativa de superficies vegetadas*

Tipo de superficie vegetada	Peso saturado (kg/m²)	Espesor de sustrato	Costo por m² (MXN)
Ecoltehado (modular)	80	9 cm	\$1,875.00
Toldo vegetal	30	8.5 mm	No disponible
Modular Kasten	99	25 cm	\$171.93
Modular Green Outfitters	98	10 cm	\$313.00
Green grid roofs	146	10 cm	\$1,712.00
LiveRoof	141	12 cm	\$578.00
Modular Cortes	No disponible	40 cm	\$967.48

Nota: Recuperado de Kasten - Paredes, 2016, p. 86

De la misma manera, estos sistemas se toman como base para diseñar un sistema modular que contribuya a mejorar la eficiencia energética de la vivienda, sea útil para el cultivo de alimentos y al mismo tiempo aumente las superficies vegetales en Tijuana.

Es importante plantear que hay dos tipos de techo verde dependiendo del espesor a su sustrato. De ahí que Cristobal, J. J. (2019) presente las siguientes definiciones para cada uno. El primer tipo es un techo verde extensivo que tiene una capa de sustrato de un grosor de 10 a 15 cm, lo que lo hace un sistema más ligero y que la plantas que se usan comúnmente son de bajo requerimientos nutricionales. El segundo, es el techo verde intensivo que por su capa de más de 30 centímetros de sustrato puede albergar gran variedad de plantas de alta demanda hídrica y nutrientes.

De acuerdo con Sahagún (2019), un sustrato mínimo de 16 cm contribuye a aislar la vivienda en un clima desértico. Este espesor de sustrato, en conjunto con plantas nativas, ayudaría a fortalecer el ecosistema de la región y adicionalmente a mejorar la eficiencia energética de una edificación. En la literatura consultada, Kasten - Paredes (2016, p. 60) señala que si se desea cultivar alimentos el espesor ideal del sustrato en un techo debe ser de 25 cm.

Si se compara el espesor de 16 cm con el de 25 cm se tiene una diferencia de 9 cm, por lo que esta variación de medidas es importante, ya que afecta el peso del sistema en la cubierta de la vivienda. De acuerdo con el Artículo VII.2 del Reglamento de la Ley de edificaciones del estado de Baja California (s.f., p. 65) se debe soportar una carga viva 100 kg por metro cuadrado en las cubiertas. Por lo tanto, será el peso máximo que podrá tener el sistema para no tener que hacer adecuaciones en la vivienda.

2.1.2 Vegetación para techos verdes

La ciudad de Tijuana se encuentra localizada dentro de la provincia florística de California y es considerada uno de los 25 lugares del mundo con gran biodiversidad (Myers *et al.*, 2000). Por esta razón es importante garantizar la conservación de las especies nativas a través de la selección de vegetación adecuada para un techo verde.

Ojeda y Huizar (2014) mencionan que se pueden aprovechar los ecosistemas naturales que rodean a Tijuana para la vegetación de espacios verdes debido a que habitan muchas plantas con gran potencial ornamental, que pueden ser utilizadas para forestar, que fomenten la biodiversidad y que contribuyen a estabilizar los ecosistemas y ofrecer servicios ambientales.

Si bien los autores anteriores se refieren en específico a parques urbanos, Vestrella (2016) describe que las cubiertas ajardinadas es una técnica que empieza a difundirse en áreas mediterráneas con un clima similar a la ciudad de Tijuana. Sin embargo, establece que la utilización de distintas especies es algo que no es sencillo en este tipo de entorno, por las condiciones de sequía y el estrés térmico que se tiene en la región.

Es importante determinar los criterios de selección para la vegetación que se va a utilizar. Para esto es necesario basarse en metodologías de selección para superficies vegetadas. De acuerdo con Minke (2010) deben de tomarse en cuenta diferentes factores. Primero se mencionan los siguientes para el techo verde:

- Espesor del sustrato
- Efectividad de almacenaje de agua
- Inclinación del techo
- Exposición al sol
- Orientación
- Las sombras
- La cantidad de precipitación

Minke (2010) señala que es esencial considerar las funciones de la vegetación seleccionada, ya que estas permiten que se le asigne un grado de importancia para priorizar las plantas que provean mayores beneficios tales como: efecto de aislamiento térmico, el efecto de enfriamiento en verano, el aislamiento acústico, el gasto por mantenimiento y el aspecto estético. Recalca que todos estos factores son importantes en la selección de vegetación, pues la elección ideal para cada espacio verde depende de sus características.

Igualmente, Minke (2010) menciona que los siguientes aspectos son decisivos y van de acuerdo con las características de la ciudad en dónde se vaya a implementar: resistencia a la sequía de las plantas, así como a las heladas, que la altura máxima de crecimiento vaya de 10 a 20 cm, que estén no condicionadas a la calidad del suelo y que tenga puntos de floración no mayores a 40 cm.

Soto *et al.* (s.f.) presenta un catálogo de especies para techos verdes en Argentina. En dicho documento se destaca la importancia de la inclusión de plantas nativas, pero se sugiere también la mezcla con plantas del género *Sedum* comerciales. *Sedum* es un género de plantas suculentas que agrupa actualmente más de 400 especies, de las cuales más de 100 se encuentran en forma natural en México. Tienen una gran capacidad de retener agua en sus

hojas, lo que las hace resistentes a la escasez de agua propia de las regiones semiáridas del país.

Para determinar las plantas que se agregarían al catálogo propuesto en este proyecto se evaluaron principalmente los siguientes aspectos: mortandad de las plantas, comportamiento en cuanto a la cobertura, su crecimiento, sanidad y fenología.

Para facilitar la selección de la vegetación, este trabajo propone la elaboración de fichas de las plantas que tengan los siguientes elementos:

- Nombre científico
- Distribución geográfica en el país
- Crecimiento
- Comportamiento en la comunidad
- La floración
- El porte
- La rusticidad

La ficha se complementará con imágenes de la planta.

También es necesario tener claro que hay servicios ecosistémicos que son relevantes para las superficies vegetadas. Uno de ellos es la captura de dióxido de carbono, respecto de lo que Domínguez (2016) señala que:

La vegetación almacena y libera carbono como resultado de los procesos fotosintéticos, de respiración y de degradación de materia seca, el saldo es una captura neta positiva cuyo monto depende del manejo que se le dé a la cobertura vegetal, así como de la edad, distribución de tamaños, estructura y composición de ésta. (p.5)

La consideración de beneficios como el anterior es relevante para estudios como este, porque la elección de las especies se podría realizar tomando en cuenta un solo indicador, la baja demanda hídrica, y sobre ese hacer análisis comparativo de cuáles son las especies más aptas

para lo que se requiere. Sin embargo, este trabajo busca tomar en consideración beneficios adicionales que puedan no solo contribuir al ahorro de agua, sino también a aportar otro tipo de consideraciones que fortalezcan los servicios ecosistémicos.

En esta investigación dos de los criterios determinantes para la selección de plantas en Tijuana es que requieran por un lado poca irrigación y por otro lado poco mantenimiento. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2016), el hacer paisajismo con plantas nativas apoya al ambiente puesto que ya se encuentran adaptadas a las condiciones del clima. Por lo anterior no requieren pesticidas, fertilizantes ni riego constante y, por consiguiente, son una buena opción para los techos y muros verdes.

La Tabla 2.2 presenta la propuesta de prioridad de características para seleccionar plantas realizada por Andrade (2014). Este orden de prioridades se hizo para la selección de especies nativas en parques urbanos de Ensenada en Baja California, en la cual el espesor del sustrato no es una variable para considerar. En el caso de este trabajo el espesor del sustrato es clave para hacer viable la propuesta, en virtud de que de este depende la carga adicional a la que se someterá a la estructura de la cubierta. En vista de lo anterior, para una propuesta de este tipo, el orden de prioridad tiene que ajustarse a la demanda de agua y al espesor de sustrato conveniente.

Tabla 2.2

Propuesta de características para seleccionar las plantas nativas en parques urbanos en Ensenada, Baja California.

No.	Rasgos
1	Tamaño (altura y diámetro promedio)
2	Flores coloridas o atractivas
3	Follaje aromático
4	Follaje colorido en otoño
5	Corteza atractiva
6	Presencia de frutos o semillas coloridos
7	Plantas atrayentes de fauna silvestre
8	Requerimientos de suelo, luz y riego

Nota: Recuperado de Andrade, 2014, p.16

Andrade (2014) presenta un listado de vegetación herbácea y arbustiva para la región de Ensenada:

- Arbustivas
 - *Encelia californica*
 - *Salvia alpiana*
 - *Peritoma arborea*
 - *Trichostema lanatum*
- Herbáceas
 - *Acmispon glaber* var. *glaber*
 - *Dudleya* spp.
 - *Penstemon spectabilis*
 - *Romneya coulteri*

Esta selección puede servir como base para las plantas que se utilizarán en Tijuana, ya que dicha ciudad presenta un clima similar al de Ensenada. Asimismo, se puede utilizar como antecedente el manual para el diseño de un jardín tolerante a la sequía del condado de Los Ángeles, debido a que tiene un clima mediterráneo. La vegetación presentada en este manual


se puede utilizar en Tijuana pues, aún si no son nativas, se encuentran adaptadas a las condiciones climáticas.

Por otro lado, es importante mencionar que para esta propuesta se consideraron tres tipos de vegetación para introducirse en las cubiertas vegetadas en Tijuana, por las diferentes funciones que cumplen y los requerimientos necesarios de cada una. Las plantas consideradas son las endémicas, las hortalizas y las del control biológico, las cuales pueden ser utilizadas en diferentes configuraciones.

Según lo mencionado por BKi *et al.* (2012), un jardín tolerante a la sequía es aquel que puede sobrevivir únicamente con el agua de lluvia y no requiere ningún riego adicional. Se logra al agrupar las plantas de acuerdo con el suelo, el agua y la luz solar que requieren.

A continuación, en la Tabla 2.3, se presentan cinco plantas que son ideales para jardines tolerantes a la sequía, de acuerdo con BKi *et al.* (2012) y que, por sus características, pueden funcionar en Tijuana:

Tabla 2.3*Listado de plantas ideales para jardines tolerantes a la sequía*

Nombre científico	Nombre común	Imagen
<i>Salvia spathacea</i>	Salvia mexicana	
<i>Verbena lilacina</i>	Verbena	
<i>Vitis californica</i>	Uva silvestre de California	
<i>Heteromeles arbutifolia</i>	Toyón	
<i>Galvezia</i>	Boca de dragón	

Nota: Recuperado de Calflora (2022)

Como se señaló anteriormente, una de las intenciones de este trabajo es establecer la viabilidad de sembrar vegetales que puedan complementar la dieta de las familias que implementen esta tecnología en Tijuana. La Tabla 2.4 presenta información sobre distintos tipos de cultivo, su producción por metro cuadrado, sus necesidades de sustrato y su requerimiento de agua.

Tabla 2.4*Listado de hortalizas y cultivos para huertos en casa*

Cultivo	Requerimiento de agua	Producción por metro cuadrado	Espesor de sustrato (cm)	Temporada de siembra
Haba	Sin exceso	0.9kg/año	25 a 40	Invierno
Judía	Sin exceso	1.8kg	25 a 30	Verano
Melón	Sin exceso (120L/mes/m ²)	3.1kg	60	Primavera
Ajo	Escaso (72 L/mes/m ²)	2.5kg	30 a 35	Invierno
Cebolla	Escaso	5.6kg	20	Otoño e invierno
Frijol	Suelo húmedo	0.6kg	5 a 7	Verano
Berenjena	Sin exceso (96 L/mes/m ²)	3.3kg	25 a 30	Otoño
Col	Sin exceso (96/mes/m ²)	3.3kg	30	Primavera
Coliflor	Sin exceso (64L/mes/m ²)	2.3kg	30	Primavera
Guisante	Sin exceso (60L/mes/m ²)	0.7kg	15	Otoño
Rábano	Suelo húmedo (150L/mes/m ²)	1.7kg	10	Otoño y primavera
Perejil	Tres veces por semana	1.7kg	15 a 20	Otoño
Menta*	Abundante	N/E	10	Otoño y primavera
Espinaca	Suelo húmedo	1.7kg	10	Todo el año
Lavanda*	Una vez por semana	0.14kg	10	Otoño

Romero*	Dos veces por semana	0.16kg	15	Otoño e invierno
Salvia*	Sin exceso	0.16kg	25 a 35	Primavera
Ruda*	Tres veces a la semana	0.16kg	2	Primavera

Nota: 1) “Agromática”, 2022) “Agroptima”, s.f. 3) “AgroHuerto”, 2022. 4) “Herbotecnia”, s.f. 5) “Huerto en casa”, 2022. *Plantas de control biológico de plagas.

Finalmente, un tercer tipo de planta que se busca introducir en esta propuesta son plantas de control biológico, las cuales tienen la función de ser barrera a las plagas que puedan afectar al huerto en el techo. Esto tiene la finalidad de disminuir el mantenimiento requerido por parte del usuario. En la Tabla 2.3 se identifican con un asterisco las plantas que pueden realizar esta función.

A continuación, se presentan algunos de los beneficios que aporta cada una de las plantas de control biológico listadas anteriormente, de acuerdo con Green Technology (2022):

- La lavanda es una planta que atrae polinizadores, a las abejas, los abejorros y mariposas.
- El romero atrae polinizadores, además defiende de la mariposa de la col y la mosca de la zanahoria.
- La salvia repele la mosca blanca, mariposa de la col y a las babosas.
- La ruda es un plaguicida natural contra los insectos y plagas
- La menta repele lepidópteros, como la mariposa de la col rizada, hormigas y ratas. Asimismo, atrae abejas, abejorros y mariposas

2.1.3 Ejemplos análogos

En esta sección, se presentarán algunos ejemplos de edificaciones que utilizan esta estrategia. Es relevante mencionar estos casos, ya que ofrecen la oportunidad de observar cómo se pueden replicar, adaptar y mejorar de manera exitosa en la ciudad de Tijuana.

Bellini, A. (2018), afirma respecto del edificio central del Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda de los Trabajadores, en Ciudad de México, que: “se construyó un peculiar pulmón verde (...) el cual además de fungir como uno de los tesoros escondidos de la capital, su inesperada presencia ha disminuido entre 10 y 15% la temperatura de este gran edificio, contribuyendo así en su ahorro de energía”.

Esta azotea cuenta con alrededor de 125 especies diferentes de vegetación que pertenecen a los siguientes ecosistemas: bosques altos, zona desértica y trópico. Por la extensión del techo se aprovechó para la implementación de huertos y andadores que dan pie a la interacción con las especies. Por lo tanto, la distribución por sección que se utilizó en este edificio permite apreciar los diferentes usos que puede tener un mismo espacio.

Figura 2.4.

Azotea verde del edificio central del INFONAVIT



Nota: Recuperado de Bellini (2018) en La azotea verde más grande de Latinoamérica está en la ciudad de México

Por otro lado, Yávar, J. (2014) describe las cubiertas verdes del Museo del Acero Horno 3. Señala que:

Particularmente interesante es el techo verde de tipo ‘extensivo’ de 700 m², (...) volviéndose este techo verde en un símbolo y máximo exponente del proyecto. Otros 1,000 m² de techos verdes de tipo ‘intensivo’ son cubiertos con pastos nativos. Juntos representan un área de 1,700 m² constituyendo uno de los techos verdes más grandes en América Latina.

En este proyecto se seleccionaron especies de bajo consumo hídrico y mantenimiento, adecuadas para replicarse en Tijuana debido a sus condiciones climáticas. Las especies utilizadas en el techo intensivo requirieron un espesor total de 500 mm, que incluye todas las membranas impermeables, el aislamiento térmico y el sustrato para plantar, instalados sobre una cubierta plana de losa-acero. En contraste, el techo extensivo, que posee una cubierta de acero poliédrica, necesita un espesor total de 210 mm, incluyendo las mismas capas. Esto sugiere que un techo extensivo sería más adecuado para viviendas, ya que facilitaría la adaptación de la estructura de la azotea por su espesor.

La Unidad Médica Familiar No. 52 del Instituto Mexicano del Seguro Social en Guadalajara, Jalisco cuenta con un techo verde extensivo con plantas de bajo crecimiento. Por la observación realizada en fotografía e imagen satelital en abril del 2022 se aprecia que el riego es únicamente por la lluvia, debido a que se ven secas. Asimismo, hay que mencionar que se encuentran segmentados los espacios verdes por líneas de concreto, los cuales se podrían utilizar como andadores estrechos, pero no se observa acceso a la azotea para el público.

En términos de los beneficios que tienen las superficies vegetadas, techos y muros verdes, hay varias investigaciones que demuestran que se mejora el confort térmico, lo que se relaciona con un menor consumo energético por el ahorro en la climatización de espacios.

Figura 2.5

Techo verde extensivo e intensivo del Museo del Acero Horno 3



Nota: Recuperado de Harari Landscape Architecture (2012) en Museo del Acero Horno 3

En el año 2013 Yeomans, Almada, y Martínez, realizaron una investigación para los techos verdes en México en las viviendas de interés social, en las cuales se utilizan dos tipos de techos verdes con diferentes parámetros y costos, la cual sirvió de base para este proyecto. En dicha investigación se demostró una disminución de la temperatura máxima y mínima promedio interior en cubiertas con vegetación en las azoteas. El estudio reporta que estas temperaturas se mantienen dentro del rango de confort.

Los sistemas modulares tienen los beneficios que se mencionaron anteriormente. Karsten (2016) diseñó módulos para azotea verdes en Zapopan con el propósito de que se utilicen para cultivo. En dicho trabajo Karsten propuso un prototipo que presentó mejoras con respecto a los del mercado en términos de costo y carga.

El módulo propuesto en Karsten (2016) tiene dimensiones de 40 por 40 centímetros con una altura de 25 centímetros, la cual que es la mínima altura necesaria para el cultivo de hortalizas. Está hecho de polipropileno y tiene una relación 75% tierra y 25% lana de vidrio

para retener la humedad y disminuir el peso. Esta mezcla con su saturación máxima de humedad alcanza un peso de 99.69 kg por metro cuadrado.

Por otra parte, la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007 publicó en 2007 las especificaciones técnicas para la instalación de Sistemas de Naturación en el Distrito Federal. En ella se encuentran las especificaciones generales, técnicas, de ejecución operación y mantenimiento acerca de los sistemas de naturación.

En la norma anterior se especifica que la vegetación para cubiertas ligeras de 50kg/m² a 90kg/m² debe de cultivarse en espesores de sustrato de 5 a 10 cm. Asimismo, que las condiciones generales que deberá soportar la vegetación en este sistema son:

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

De igual manera, aborda lo que sucede cuando se quiere naturar una azotea que tiene un sistema fotovoltaico o solar térmico. También explica qué se tiene que realizar si esta naturada la azotea y se desea colocar algún sistema solar.

De acuerdo con la norma se debe realizar lo siguiente:

- El sistema solar deberá colocarse por lo menos 20 cm por encima del nivel de sustrato o bien en zonas de la cubierta que no cuenten con vegetación.
- Los soportes para las celdas deberán ser impermeabilizados en los puntos de contacto con la losa o cubierta
- La vegetación deberá colocarse a una distancia que garantice a largo plazo que no haya proyección de sombra sobre los paneles solares.

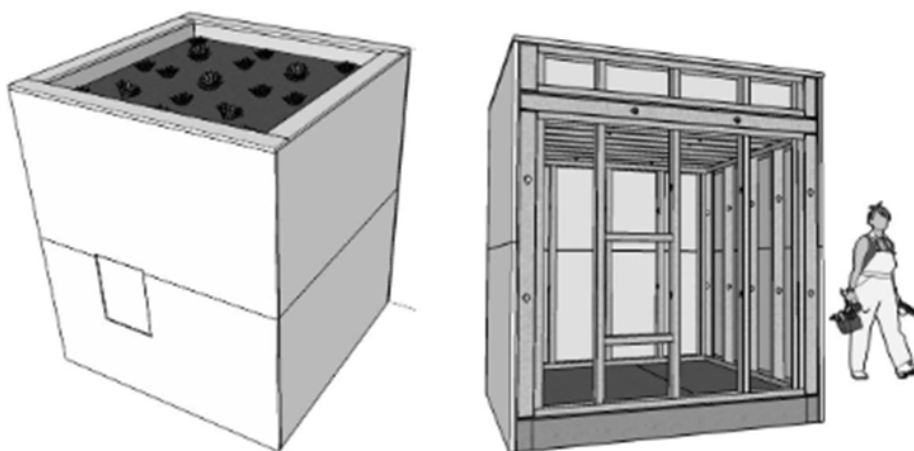
Los ejemplos anteriores muestran que los techos verdes pueden trabajar en armonía con otras ecotecnologías para mejorar el rendimiento energético de las viviendas.

2.1.4 Superficies vegetadas en Tijuana

En la ciudad de Tijuana, Sahagún realizó en 2019 un estudio con un módulo físico (Figura 2.6) para evaluar el comportamiento térmico de un techo verde en clima desértico y así determinar cómo sería un modelo que funcione para las condiciones del clima seco de la ciudad. En él demostró la diferencia de temperaturas entre un techo común, uno que utiliza únicamente el sustrato y otro con vegetación desértica. El resultado es que en la temporada de verano el techo verde mantuvo a la vivienda dentro de la zona de confort durante un alto porcentaje del tiempo. Además, se menciona que el techo no requirió mantenimiento y tuvo riego nulo durante el tiempo de la experimentación. El espesor del sustrato es de 16 cm, por lo que se tomará como punto de partida para el diseño de la propuesta.

Figura 2.6

Módulo físico de evaluación de techo desértico



Nota: Recuperado de Sahagún (2019, p.63)

Es importante a su vez compartir el histórico del clima en la ciudad para que se conozcan las condiciones bajo las que se encontrará el sistema. De acuerdo con lo presentado en Wheeler

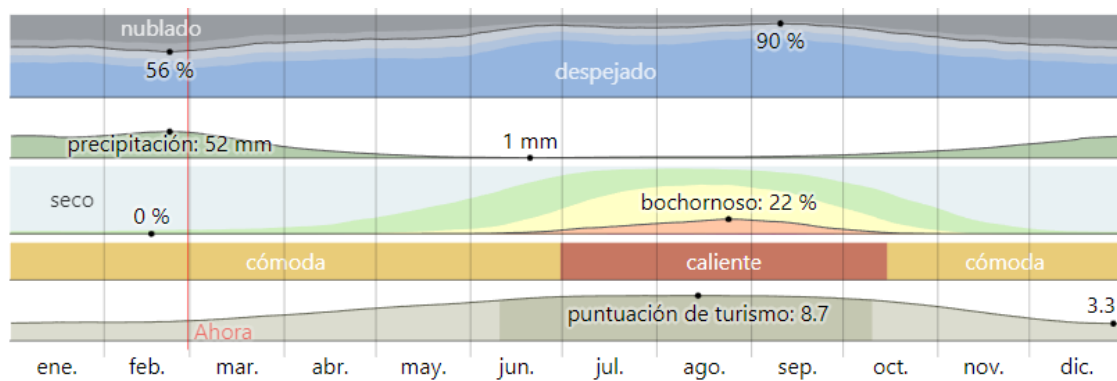
Spark (2021), “en Tijuana, los veranos son cortos, calurosos, áridos y mayormente despejados y los inviernos son largos, frescos y parcialmente nublados. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 9 °C a 26 °C y rara vez baja a menos de 5 °C o sube a más de 30 °C.”

En el gráfico de la Figura 2.7 se presenta un resumen de las condiciones climáticas por mes. Debe resaltarse la precipitación promedio anual de 220 mm y que febrero es el mes del año con mayor precipitación, con un promedio de 52 mm.

También hay que mencionar que las condiciones del clima han cambiado en los últimos años porque se han presentado situaciones atípicas, tanto de los rangos de temperatura como en el temporal de lluvia.

Figura 2.7

Histórico de clima en Tijuana



Nota: Recuperado de Wheater Spark (2021)

Al momento de diseñar una superficie vegetada el sustrato es una parte importante para que se puedan mantener las condiciones óptimas para la vegetación. Normalmente se utiliza tierra para el cultivo, pero esto hace que el peso de la superficie se incremente, por lo que se recurre a opciones que pueden ayudar a disminuir el peso.

Una de las opciones es la perlita que, de acuerdo con hydroenvironment (s.f.), es un mineral que puede ser reciclado y es muy liviano. Es 15 veces más ligero que la arena y 8 veces más ligero que la arcilla expansiva. Apoya a la retención de agua ya que puede retener 5 veces su

peso. Además, México es uno de sus principales productores y es utilizada con frecuencia en la horticultura.

Por otro lado, el hidrogel de acuerdo con Ramirez et al. (2016), son “geles poliméricos hidrofílicos formados por una red tridimensional que tiene la capacidad de absorber una gran cantidad de agua, hinchándose y aumentando considerablemente su volumen sin perder su forma, hasta alcanzar su máximo grado de hidratación”.

Por último, la paja son los tallos secos de ciertas gramíneas. Es utilizada para “protección del suelo, (...). Es en este sentido que se usa para mantener la humedad después de haber sembrado (...) (y es una) de las alternativas dentro del grupo de materiales protectores de la capa húmeda del suelo” (LUMITOS, 2022)

2.1.5 Financiamiento para ecotecnias

La accesibilidad económica de las superficies vegetadas es un tema que resulta importante para este trabajo de investigación. Por esta razón es importante conocer acerca del programa de Hipoteca Verde que se encuentra incluido en todos los créditos de INFONAVIT.

De acuerdo con INFONAVIT (2017), la Hipoteca Verde se trata de un monto adicional que se otorga a todos los créditos para que se disminuyan los consumos de agua, luz, y gas, ya sea para las viviendas que se compran, construyen o remodelan con un crédito del Instituto.

Entre las ecotecnologías que se mencionan están las llaves, inodoros, focos, aislantes térmicos, calentadores solares, refrigeradores y estufas eficientes, así como lavadoras ahorradoras de grado ecológico.

El techo verde, de acuerdo con las características mencionadas anteriormente, apoya al ahorro energético para la climatización de viviendas, gracias a que tiene función de

aislamiento térmico. Por lo tanto, es una ecotecnología que disminuye el consumo de energía y aportar otros beneficios.

El programa Hipoteca Verde tiene la finalidad de contribuir al cuidado de la preservación del medio ambiente asegurando un ahorro en los consumos. Sin embargo, algunas de las ecotecnologías aplicables dependen del clima donde se ubica la vivienda. Para esto el INFONAVIT hizo una división de las regiones bioclimáticas, Tijuana se encuentra en el número cuatro: templado seco.

El monto máximo de financiamiento por Hipoteca Verde en noviembre de 2021 es de \$54,488.96 pesos mexicanos. Esta cantidad depende de la Unidad de Medida y Actualización Mensual (UMAM) en la que se encuentre el derechohabiente que solicite el crédito. Se empieza desde un monto de 10,897.79 mexicanos.

Es necesario mencionar que para el INFONAVIT todos los créditos deben contar con Hipoteca Verde y, sin importar el bioclima, el aislamiento térmico en el techo es requisito en todas las viviendas como parte de la línea base de dicha hipoteca. En el Manual Explicativo Vivienda Ecológica del 2021 (p. 33) en la sección de uso eficiente de la energía se establece que como requisito el aislamiento térmico del techo debe de tener lo siguiente:

- Solución constructiva que cumpla con el valor mínimo de “R” para techos (igual o mayor a 1.40 (m²K/W)), con base en el método de cálculo de la NMX-C-460-ONNCCE.
- Certificado de materiales termoaislantes que cumplan la NOM-018-ENER-2011.

También existen otros apoyos, como los Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA, 2020), cuyo objetivo es contribuir con proyectos que brinden soluciones a problemas ambientales y que puedan superar las barreras financieras que limitan su implementación.

De ahí que los programas y productos financieros de FIRA apoyan la implementación de ecotecnias en edificaciones como son los bonos verdes y el ProSostenible. Por medio de estos

bonos verdes se apoya a proyectos que fomentan la producción de alimentos de una forma climáticamente más inteligente y que cuidan el recurso hídrico, por lo que este mecanismo podría emplearse para promover la naturación de cubiertas que contribuyan a la producción de alimentos.

2.1.6 Servicios ecosistémicos de un techo verde

Los servicios ecosistémicos son beneficios que se proveen a la sociedad desde los ecosistemas y son vistos desde una perspectiva antropocéntrica. Por lo tanto, se reconocen aquellos que se suman al sistema socio-ecológico.

Según Balvanera *et al.* (2017) existen cuatros tipos de servicios ecosistémicos y cada uno de ellos se beneficia de la biodiversidad. Uno de los grupos en que se clasifican estos sistemas se denomina servicios de aprovisionamiento, que se refieren a bienes y materia prima que es extraída del sitio para ser utilizados en algún proceso industrial o para consumo.

Figura 2.8
Servicios ecosistémicos



Nota: Recuperado de la WWF (2018)

Existe otro grupo de servicios ecosistémicos que se refiere a los servicios de regulación, los cuales se dan gracias a los procesos naturales que hace el ecosistema y que benefician a la sociedad. Por ejemplo, la fertilidad del suelo, la prevención de inundaciones o la regulación del clima. Un siguiente grupo se refiere a los servicios culturales que se dan a partir de la relación del ser humano con el entorno y toman en cuenta las tradiciones y el conocimiento ancestral, también el uso como espacios de recreación. Por último, los servicios de soporte son aquellos procesos biológicos fundamentales dentro del ecosistema que permiten que este funcione, tal como la fotosíntesis.

Las superficies vegetadas (en específico, los techos verdes) son espacios que proveen servicios ecosistémicos a la ciudad y el edificio donde se implementen. De acuerdo con Zielinski *et al.* (2012), dependiendo del sistema utilizado, los beneficios que provea un techo verde pueden variar. Sin embargo, los autores anteriores coinciden en que en todos los casos se presentan los siguientes:

- Mejoramiento de la calidad del aire: La vegetación puede retener polvo y partículas contaminantes, así como filtrar las partículas de aire por la captación de CO₂ y liberación de oxígeno.
- Manejo de aguas de lluvias: Retarda el flujo hacia el drenaje por lo que disminuye la escorrentía.
- Regulación de temperatura y ahorro de electricidad: Tiene un alto efecto de aislamiento térmico, por lo que reduce el consumo de energía eléctrica por climatización.
- Prolongación de la vida útil de la cubierta: Los sistemas protegen al techo de las variaciones extremas de temperatura y esto aumenta la durabilidad estructural.
- Reducción del efecto isla de calor: “La vegetación, debido a su comportamiento térmico y físico, absorbe el calor y lo utiliza a través del proceso de evapotranspiración, reduciendo la temperatura urbana y el efecto de smog” (Zielinski *et al.*, 2012, p. 95).

- Creación de hábitats: Contribuyen a la conservación de la diversidad urbana, aves nativas y polinizadores. Apoya también al cuidado de especies protegidas y endémicas.
- Reducción de ruido: Es una barrera de sonido que disminuye significativamente el ruido del exterior.
- Beneficios psicológicos y físicos: Se encuentran relacionados con la relajación, regeneración y reducción de estrés.
- Beneficios sociales: Espacios de descanso o esparcimiento.
- Reconocimiento y responsabilidad ambiental: Distinción para los proyectos en los que se emplean, de la misma forma beneficios en certificaciones ambientales.
- Incremento del valor comercial: Representa un valor agregado a los inmuebles que va entre un 6% a un 15%.
- Productividad y generación de ingreso: Se puede practicar la agricultura urbana para el autoconsumo o la venta.

De la misma manera, darle al techo verde un mantenimiento agroecológico produce beneficios sociales y económicos y es una alternativa que previene el despilfarro de agua y la utilización de productos químicos. De acuerdo con Gutierrez et al. (2008), “Los enfoques agroecológicos alternativos están basados, tanto como es posible, en el uso de recursos localmente disponibles, si bien no se rechaza totalmente el uso de insumos externos.” (p.76)

Por lo tanto, una cubierta verde que tiene un manejo agroecológico permite generar productos amigables con el medio ambiente, que sean económicos para las personas puesto que generan un ahorro o se hacen con los materiales que se encuentran en casa. Algunos ejemplos son la composta, rotar cultivos por temporadas, insecticidas naturales con ingredientes de cocina, diseño con plantas de control biológico, entre otros.

2.2 Referencias conceptuales del tema

El tema propuesto en este trabajo se encuentra intrínsecamente relacionado con la especialización de diseño verde, por lo que permite un acercamiento profesional y aplicable de esta área en las edificaciones. Los techos verdes son una estrategia que, de acuerdo con McCombs, H. C. (2015), se considera dentro de la certificación LEED en la categoría “Sitios Sustentables” bajo el razonamiento de que reduce las superficies impermeables características de los edificios.

Cristobal, J. J. (2019) afirma que los techos verdes ayudan a disminuir la temperatura de edificaciones y que se puede observar que una edificación con un sistema de superficies vegetadas se calienta mucho menos que uno tradicional. Asimismo, confirma que “si se aplica la tecnología de los techos verdes que son considerados de materiales fríos, como una estrategia de ahorro de energía, esta sería responsable de un 40% de ahorro” (p. 13), reafirmando que son una técnica pasiva con un alto potencial de mejora en el sector energético. Razón por la cual su aplicación en edificios habitacionales representa un ahorro y valor agregado.

2.2.1 Eficiencia energética

La eficiencia energética según la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA, 2023) se refiere a la reducción del consumo de energía con el objetivo de obtener mejores resultados en la conservación de recursos energéticos. Este mismo término Guerrero (2013) lo define como la disminución del consumo energético, manteniendo los mismos niveles de calidad de vida, sin reducir nuestro confort y cuidando el ambiente, garantizando el abastecimiento y fomentando la sostenibilidad en el uso de la electricidad.

Por otra parte, de acuerdo con Flores *et al.* (2019) la eficiencia energética es un parámetro importante para evaluar las viviendas “ecológicas” que toman en cuenta los siguientes indicadores: aislamiento acústico y conductividad térmica. Además, se señala que estos

parámetros están relacionados con las normas tanto regionales como nacionales, y que se pueden utilizar estándares internacionales como referencia para determinar la eficiencia de una vivienda.

2.2.2 Relación entre conceptos

La relación entre los conceptos principales permite identificar cómo investigaciones anteriores han establecido relaciones entre ellos y reconocido cómo funcionan como propuesta. Por ejemplo, Azeñas (2017) relaciona las superficies vegetadas y los servicios ecosistémicos, por medio de un sistema experimental de qué demostró la manera en que las cubiertas verdes proveen servicios gracias a especies mediterráneas en un techo verde extensivo en España.

Por otra parte, una relación entre las superficies vegetadas y la eficiencia energética se observa con Pérez & Coma (2020), quienes mencionan que en la construcción sustentable se puede utilizar la naturaleza para reducir la demanda energética y el consumo de agua y lograr así una mejora desde el diseño. Por último, hay que mencionar a Porcar (2019), quien relaciona a los servicios ecosistémicos y la vivienda, ya que cuantifica mediante indicadores la calidad de los servicios que se proveen a la ciudad por medio de las edificaciones y se reconoce cómo incluso en escala local se puede apoyar a realizar un cambio significativo.

3. Diseño metodológico

3.1 Supuesto de trabajo

Las superficies vegetadas con plantas nativas en techos de una vivienda horizontal son una estrategia pasiva viable para mejorar la eficiencia energética y que aporta a los servicios ecosistémicos de la ciudad. Los techos verdes apoyan a mejorar el confort higrotérmico de los ocupantes y son espacios de recreación que aportan beneficios ambientales y sociales para los habitantes.

3.2 Preguntas generadoras

Pregunta principal

¿Cuáles son las especificaciones constructivas y los requisitos funcionales con los que puede diseñarse una propuesta asequible de un sistema de techos verdes para satisfacer la aportación de servicios ecosistémicos y eficiencia energética de la vivienda en Tijuana?

Preguntas secundarias

¿Cuánto es la relación costo-beneficio que representa implementar vegetación en la azotea en una vivienda?

¿Cuáles son los impactos en términos de sustentabilidad (social, económico y ambiental) de la implementación de naturación en la azotea en los habitantes de una casa?

¿Qué vegetación es idónea para ser utilizada en los techos verdes en Tijuana?

3.3 Objetivos

Objetivo general:

Desarrollar una propuesta constructiva y funcional de un sistema de techo verde, que sea asequible para la vivienda de Tijuana, que contribuya a mejorar la eficiencia energética de la edificación y que aporte servicios ecosistémicos.

Objetivos específicos:

- Realizar un estado del arte de los techos verdes y sus características
- Describir el impacto social del techo verde en los ocupantes de una casa.
- Determinar la vegetación ideal para implementar en una azotea en Tijuana.
- Simular el ahorro energético en Design Builder de diferentes espesores de sustrato
- Analizar la relación costo-beneficio de implementar techo verde en la vivienda

3.4 Elección metodológica

El proyecto se aborda desde un enfoque mixto: cualitativo y cuantitativo. El enfoque cuantitativo toma en cuenta variables exactas, medibles y objetivas acerca del consumo energético y el aumento de la superficie de vegetación, mientras que el enfoque cualitativo busca evaluar las áreas verdes y el confort térmico de acuerdo con la percepción de los ocupantes de la vivienda, así como el uso e impacto que en su vida tiene el aumento de áreas vegetadas.

El desarrollo de la propuesta parte de una investigación documental, que se complementa con otras técnicas de investigación como son los cuestionarios, las entrevistas, las dinámicas participativas y la observación directa.

La metodología de este Trabajo de Obtención de Grado se divide en cinco etapas que van de acuerdo con los objetivos de cada asignatura de Investigación, Desarrollo e Innovación (IDI) que se cursaron en este posgrado. El procedimiento metodológico se muestra en forma detallada en la Tabla 3.3. Es importante establecer que esta es una investigación con una postura epistémica crítica y una perspectiva disciplinar desde la arquitectura, relacionada con las ciencias ambientales.

3.5 Selección de técnicas y diseño de instrumentos

3.5.1 Aplicación de cuestionarios

El cuestionario es una herramienta de investigación útil para adentrarse en la aceptación del proyecto y el impacto que tendrá en los ocupantes de las viviendas. Asimismo, el cuestionario permite obtener datos cuantitativos y cualitativos para presentar futuras propuestas o realizar modificaciones. Por último, las estadísticas obtenidas darán un panorama de la población de la zona y su estilo de vida.

La herramienta de investigación tiene como objetivo analizar la percepción de confort térmico de los ocupantes y su postura con respecto a implementar vegetación en la vivienda. Asimismo, obtener datos energéticos por casa y de hábitos de uso.

Tabla 3.1*Observables e indicadores del cuestionario*

<i>Observable</i>	<i>Indicadores</i>
Consumo energético	<ul style="list-style-type: none"> ● Consumo de energía por equipo ● Horas de uso del equipo
Confort térmico	<ul style="list-style-type: none"> ● Percepción de temperatura ● Zonas de alta demanda térmica
Conciencia ambiental	<ul style="list-style-type: none"> ● Hora de actividades con contacto en la naturaleza ● Hábitos sustentables
Vivienda	<ul style="list-style-type: none"> ● Número de habitaciones ● Metros cuadrados de superficie
Vegetación	<ul style="list-style-type: none"> ● Especies de plantas ● Número de macetas o metros de área verde
Riego de plantas	<ul style="list-style-type: none"> ● Consumo de agua semanal en litros ● Tipo de agua para riego (potable, de lluvia, reutilizada) ● Hábitos o prácticas sustentables

Para levantar la información que se detalla en la Tabla 3.1 se elaboró un cuestionario digital en la plataforma Google Forms, que puede consultarse en el Anexo 1. El cuestionario aplicado consta de 30 reactivos distribuidos en varias secciones: características de la vivienda, vegetación, confort térmico, consumo energético y superficies vegetadas. Estas secciones permiten obtener una visión detallada de los aspectos clave que afectan la calidad de vida de los residentes y el impacto ambiental en las colonias seleccionadas.

Se eligieron las colonias Santa Fe y El Lago debido a sus características específicas y la accesibilidad para realizar los cuestionarios. Ambas colonias tienen mayoritariamente viviendas unifamiliares de interés medio. Santa Fe está en la periferia de Tijuana, cerca de Playas de Rosarito, mientras que El Lago se encuentra en una zona más céntrica, cerca del río Tijuana. Se optó por estudiar estas dos colonias debido a su accesibilidad y para asegurar un análisis detallado y preciso en lugar de abarcar más colonias de manera superficial.

Una vez determinadas las colonias en las que se aplicaría la encuesta, el cuestionario se hizo llegar a los vecinos a través del chat de vecinos, de redes sociales y de contactos de personas que viven en ambas colonias. La encuesta en la colonia El Lago se realizó entre el 2 de marzo del 2022 y el 8 de abril de 2022 y se obtuvieron 18 respuestas. La encuesta en la colonia Santa Fe se realizó entre el 2 de marzo y el 8 de abril de 2022 y se obtuvieron un total de 8 respuestas. La encuesta no buscaba alcanzar una validez estadística, por lo que no se realizó un diseño de muestra aleatoria. Con este instrumento se buscaba únicamente identificar de manera general las características de las viviendas y la percepción de sus habitantes respecto del confort higrotérmico y el consumo de energía.

3.5.2 Observación directa

La observación directa es una herramienta de investigación valiosa para este trabajo ya que permitió identificar y evaluar de manera precisa la presencia y el estado de la vegetación en el entorno urbano. Esta técnica facilitó la recopilación de datos detallados sobre las plantas presentes en las viviendas y espacios comunes.

El objetivo principal de emplear esta herramienta fue examinar la variedad y el estado de las áreas verdes entre las viviendas, así como la vegetación presente en las residencias y su función específica. Se buscó determinar si las plantas se encontraban en macetas, áreas de jardín o en techos, proporcionando una visión integral de la integración de la vegetación en el entorno residencial.

La selección del área de estudio se realizó mediante un análisis previo utilizando imágenes satelitales de las colonias El Lago y Santa Fe donde se aplicaron encuestas. A partir de este análisis se determinó que la colonia El Lago sería el foco de la observación directa en sitio, debido a su predominancia de viviendas familiares, su clasificación como zona de interés medio y facilidad de acceso.

La observación directa se llevó a cabo el 9 de marzo de 2022 en la colonia El Lago. El estudio abarcó una privada, cuatro calles de viviendas unifamiliares, tres edificios plurifamiliares y cuatro áreas comunes, con lo que se buscó alcanzar una muestra representativa de la zona.

La metodología de recolección de datos incluyó un extenso reporte fotográfico, complementado con notas detalladas tomadas in situ. Esto permitió realizar un conteo estimado de la cantidad de plantas en las áreas observadas, así como documentar su estado y ubicación. Este enfoque combinado de documentación visual y anotaciones escritas aseguró una captura completa y precisa de la información relevante para el estudio.

3.5.3 Revisión documental para la selección del sistema

Como parte de este trabajo se realizó una revisión documental de los sistemas prefabricados y modulares de techos verdes ya existentes para determinar los siguientes aspectos:

- Costo
- Peso saturado
- Dimensiones del sistema
- Disponibilidad en el mercado mexicano

En la Tabla 2.1 de la página 50 se resumen los diferentes sistemas disponibles comercialmente en México y que son competitivos para ser elegidos en el marco de este trabajo. En los criterios de selección se tomó en cuenta como principal característica el costo y la disponibilidad en el mercado mexicano.

Con base en la priorización de los aspectos señalados anteriormente se busca elegir un sistema modular asequible y eficiente para techos verdes en Tijuana.

3.5.4 Entrevistas semiestructuradas

Como parte de este trabajo se realizaron entrevistas con el objetivo profundizar con expertos y expertas en el ámbito de la implementación de una superficie vegetada y sus características, tales como tipo de vegetación y los aportes que tienen en el entorno urbano, así como conocer el mantenimiento para cada uno de ellos. Se busca que con la información recabada de las entrevistas sea posible determinar un diseño de superficie vegetada que sea estético y funcional para la vivienda.

Se determinó el siguiente perfil de informantes:

Persona experta en la implementación de vegetación en edificación, desde una perspectiva arquitectónica o de ingeniería civil, que participe en proyectos de la ciudad con techos o muros verdes.

La guía de temas para abordar con estos informantes fue:

1. Vegetación
 - a. Tipos de plantas
 - b. Tendencias de mercado
 - c. Beneficios de la superficie vegetada
2. Impacto social
 - a. Razones por las que se implementa
 - b. Usos que se le dan a la superficie vegetada
 - c. Características de las viviendas que lo implementan
3. Análisis financiero
 - a. Costo de mantenimiento por metro cuadrado
 - b. Costo de instalación
 - c. Modificaciones estructurales
 - d. Impacto en el costo de proyectos nuevos contra los existentes

Por otro lado, se contactaron a profesionistas especializados en plantas nativas y de la región, con un enfoque en el entorno y la agricultura urbana en Tijuana, para hablar sobre los siguientes puntos:

1. Especies vegetales
 - a. Alimentos que se puede cultivar en Tijuana
 - b. Plantas nativas o de la región
 - c. Producción anual
2. Mantenimiento y características la superficie vegetada
 - a. Requerimiento de agua
 - b. Horas de dedicación
 - c. Espesor del sustrato
 - d. Demanda de espacio
3. Servicios ecosistémicos
 - a. Función en la cadena trófica
 - b. Detalles en captura de dióxido de carbono
 - c. Microecosistemas que se crean

Se realizaron cinco entrevistas por videollamada a personas con experiencia en el tema de naturación, infraestructura verde y superficies vegetadas. Se tuvo el apoyo de personas en el ámbito académico y de investigación, así como profesionistas en esta industria. El contacto y las reuniones para entrevista se acordaron a través de correo electrónico, las cuales se realizaron en las siguientes fechas:

- Dra. Lina Ojeda el 9 de marzo de 2022
- Mtra. Yazmin Ochoa el 11 de marzo de 2022
- Lic. Mónica Erandi el 14 de marzo de 2022
- Lic. Samuel Pérez el 21 de marzo de 2022
- Lic. Roberto Huber el 29 de abril de 2022

3.5.5 Investigación para la selección de la vegetación

La metodología para seleccionar la vegetación adecuada para los techos verdes se basó principalmente en una exhaustiva revisión documental y un análisis comparativo. Este enfoque permitió una selección informada y sistemática de las especies más apropiadas para el contexto local.

En primer lugar, se realizó una investigación documental mediante plataformas especializadas enfocadas en la flora nativa de la región de Baja California. Esta revisión proporcionó información detallada sobre los requerimientos de mantenimiento, características y funciones de diversas especies, tanto nativas como exóticas. Este paso fue crucial para comprender las necesidades específicas de cada planta y su potencial adaptación a las condiciones de un techo verde.

A partir de la información recopilada, se elaboró una tabla comparativa que permitió un análisis más profundo y sistemático de las especies consideradas. Esta tabla incluyó criterios clave como el espesor de sustrato requerido, las necesidades hídricas de cada planta, y su clasificación como nativa o exótica. Además, se consideró la función potencial de cada especie en el techo verde, ya sea ornamental o alimenticia.

Este análisis comparativo facilitó la evaluación objetiva de cada especie, lo que permitió una selección basada en criterios cuantificables y relevantes para el éxito de un techo verde en el contexto específico de Baja California. La combinación de la revisión documental y el análisis comparativo aseguró que la selección de vegetación no solo fuera apropiada para las condiciones locales, sino también eficiente en términos de mantenimiento y funcionalidad.

Esta metodología integral permitió catalogar las especies según sus características y funciones, y proporcionó una base sólida para la selección final de la vegetación más adecuada para los techos verdes en la región.

3.5.6 Diseño experimental

Para determinar la capacidad de retención de humedad del sustrato en un techo verde para vivienda en Tijuana, se desarrolló un diseño experimental que puso a prueba diferentes composiciones de sustrato. El experimento se llevó a cabo en tres estaciones:

- Otoño 2022 (septiembre a noviembre del 2022)
- Invierno 2022 (iniciando en diciembre del 2022 hasta febrero del 2023)
- Primavera 2023 (marzo a mayo del 2023)

Esto, para obtener una comprensión más completa del comportamiento de los materiales bajo diferentes condiciones climáticas.

Los materiales que se utilizarán en la composición del sustrato incluirán:

1. Tierra de abono
2. Perlita
3. Hidrogel
4. Paja
5. GROW (preparación para sustituir tierra de abono)

En todos los experimentos, la tierra de abono constituyó la mayor proporción del sustrato, generalmente el 75% o más. El volumen restante se dividió entre los otros materiales probados, cuyas proporciones variaron en las diferentes rondas de experimentación.

Los sustratos se colocarán en contenedores de 13 cm de profundidad, que se mantendrán expuestos al sol en la azotea durante todo el día. Esta disposición tiene como objetivo simular las condiciones reales de un techo verde en Tijuana. La profundidad elegida representa un espesor adecuado para un techo verde extensivo, permitiendo el crecimiento de una variedad de plantas sin añadir excesivo peso a la estructura del techo.

El régimen de riego será manual, con medio litro de agua vertida en cada contenedor al inicio del experimento. Esto permitió comparar la capacidad de retención de humedad de los diferentes sustratos bajo condiciones controladas. Se utilizará un higrómetro para evaluar diariamente la humedad en el suelo, lo que permitirá determinar el número de días que estos materiales apoyan la retención de agua, así como el grado de humedad en las condiciones climáticas específicas de Tijuana.

Las rondas de experimentación comenzaron en Otoño 2022 con las siguientes composiciones iniciales de sustrato:

1. Control 100% Tierra
2. Paja 25% + Tierra 75%
3. Paja 12.5% + Hidrogel 12.5% + Tierra 75%

4. Hidrogel 25% + Tierra 75%
5. Hidrogel 2% + Tierra 98%
6. Perlita 25% + Tierra 75%

La metodología propuesta se basa en un proceso iterativo de experimentación. Cada ronda subsecuente utilizará el conocimiento obtenido de la anterior, centrándose en los sustratos que muestren resultados más prometedores. Este enfoque permitió refinar progresivamente las composiciones, a través de ajustar los porcentajes y combinaciones de materiales.

El objetivo de este proceso iterativo fue encontrar la combinación óptima de materiales que ofrezca la mejor retención de humedad y rendimiento general para las condiciones específicas de Tijuana. A medida que se avanzó en las rondas de experimentación, se pudieron introducir nuevos materiales (como el GROW) o modificar las proporciones de los existentes, siempre basándose en los resultados observados.

En este experimento, se compararán las diferentes composiciones de sustrato entre sí, utilizando como referencia el control de 100% tierra. Los parámetros clave para la comparación serán:

1. La capacidad de retención de humedad (medida con el higrómetro)
2. El número de días que el sustrato mantiene un nivel de humedad adecuado
3. El comportamiento del sustrato bajo diferentes condiciones climáticas estacionales

Los resultados del diseño experimental se considerarán útiles si permiten identificar una o más composiciones de sustrato que:

1. Mantengan una mayor retención de humedad en comparación con el control
2. Demuestren un rendimiento consistente a lo largo de las diferentes estaciones
3. Requieran menos riego frecuente, lo que indicaría una mayor eficiencia en el uso del agua

El experimento se realizó primero en el Otoño 2022, luego en el Invierno 2022, y finalmente en la Primavera 2023 con los sustratos que hayan mostrado los mejores resultados en las rondas anteriores. Este diseño experimental permitió evaluar sistemáticamente la capacidad

de retención de humedad de diferentes composiciones de sustrato a lo largo de varias estaciones, lo que proporcionó datos valiosos para la selección del sustrato más adecuado para techos verdes en el clima específico de Tijuana.

3.6 Cuadro de operacionalización de variables

El cuadro de operacionalización de variables que se muestra en la Tabla 3.2 presenta la manera como se van a observar y trabajar los conceptos principales de este trabajo. Asimismo, la Tabla muestra a través de que indicadores y herramientas se obtendrán los resultados para lograr los objetivos de la investigación.

Es importante mencionar que cada concepto tiene una relación directa con el resultado esperado en la propuesta, por lo que los observables se eligieron de tal forma que sean pertinentes para el objetivo principal.

De la misma manera, por medio de los indicadores, será posible medir el impacto que la implementación del sistema tiene en cada concepto y poder comparar los resultados.

Tabla 3.2

Cuadro de operacionalización de variables

Concepto	Observables	Indicadores	Herramienta
Eficiencia energética	<ul style="list-style-type: none"> - Ahorro energético - Aislamiento térmico - Estrategias pasivas - Confort térmico 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo de consumo - Temperatura interior vs. exterior - Porcentaje de ahorro en costos de climatización - Porcentaje de horas en rango de confort 	<ul style="list-style-type: none"> - Investigación documental - Cuestionario
Servicios ecosistémicos	<ul style="list-style-type: none"> - Servicios culturales, aprovisionamiento, soporte y regulación - Captura de dióxido de carbono 	<ul style="list-style-type: none"> - Metros cuadrados área verde por habitante 	<ul style="list-style-type: none"> - Observación directa - Cuestionario - Investigación documental

	<ul style="list-style-type: none"> - Espacio de interacción - Especies endémicas - Beneficios ambientales a la vivienda - Interacción con fauna - Disminución de temperatura - Producción de alimentos 	<ul style="list-style-type: none"> - Toneladas de CO2 capturadas anualmente - Horas de uso del espacio - Número de especies endémicas presentes - Índice de calidad del aire - Número de especies de fauna observadas - Reducción del efecto isla de calor (°C) - Cantidad de alimentos producidos (kg) 	
Techos verdes	<ul style="list-style-type: none"> - Confort higrotérmico - Clima - Demanda hídrica - Mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Índice de confort higrotérmico - Adaptabilidad de la vegetación al clima local - Litros semanales de riego - Horas de dedicación semanal 	<ul style="list-style-type: none"> -Observación directa -Investigación documental -Entrevista
Elementos constructivos	<ul style="list-style-type: none"> - Impermeabilizantes - Material de la superficie - Escaleras y accesos - Refuerzo estructural - Pretils y barandales 	<ul style="list-style-type: none"> - Durabilidad en años - Resistencia a la intemperie (escala) - Cumplimiento de normas de seguridad (%) - Capacidad de carga adicional (kg/m²) - Altura y resistencia según normativa 	<ul style="list-style-type: none"> -Observación directa -Entrevista

3.7 Ruta crítica de trabajo

La presente ruta crítica del proyecto en la Tabla 3.3 detalla las etapas esenciales, y especifica los objetivos, herramientas y productos de cada fase. Este enfoque estructurado garantiza que se alcancen los objetivos establecidos y se cumplan los requisitos mediante el uso adecuado de herramientas y la entrega de resultados específicos en cada fase.

Tabla 3.3

Etapas para el desarrollo del trabajo

	Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Etapa V
Objetivo	Definir problemática resolver y la metodología del trabajo	-Describir el impacto ambiental y social de los techos verdes en la vivienda y la ciudad. -Examinar la relación del consumo energético con las superficies vegetadas	-Analizar el costo-beneficio de las superficies vegetadas en la vivienda horizontal unifamiliar	-Redactar la propuesta de superficies vegetadas. -Evaluar viabilidad de la propuesta.	Presentar una propuesta viable de superficies vegetadas para la edificación vertical de Tijuana que demuestre el ahorro energético y los beneficios ecosistémicos que aportan las superficies vegetadas
Herramienta	Investigación documental	Cuestionario, grupo de discusión y observación directa.	Investigación documental.	Revisión de expertos en el TOG	Resultados de herramientas de investigación.
Producto	Diseño metodológico	Resultados de herramientas de investigación y referencias para el diseño.	Guía de diseño de la propuesta	Borrador del proyecto	Proyecto profesionalizante con la propuesta a detalle

4. Análisis, desarrollo de la propuesta y resultados

4.1 Síntesis interpretativa de los datos analizados

4.1.1 Cuestionarios

Se aplicó un cuestionario en dos colonias de Tijuana, El Lago y Santa Fe, utilizando formularios digitales distintos, pero con las mismas preguntas. Los resultados obtenidos abarcan datos sobre las viviendas, el consumo energético, el confort térmico, y la percepción, hábitos y expectativas de los residentes acerca de las superficies vegetadas. A continuación, se presenta un resumen de los resultados más relevantes, con las gráficas correspondientes. El resto de los gráficos pueden consultarse en los anexos de este trabajo.

En primer lugar, la sección de datos de la vivienda proporciona información sobre las características de los hogares encuestados. En El Lago, el número de habitantes por vivienda varía entre 2 y 4 personas, mientras que, en Santa Fe, el 50% de los encuestados informó que viven 4 personas en su hogar. En ambas colonias, la mayoría de las viviendas son unifamiliares de dos niveles con techos de concreto.

Figura 4.1

Gráfico de cuestionario El Lago

¿Cuántos metros cuadrados aproximadamente tiene en su casa destinados a la vegetación?

18 respuestas

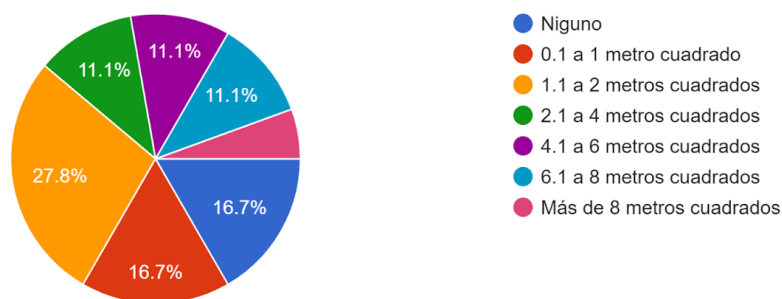


Figura 4.2

Gráfico de cuestionario Santa Fe

¿Cuántos metros cuadrados aproximadamente tiene en su casa destinados a la vegetación?
8 respuestas

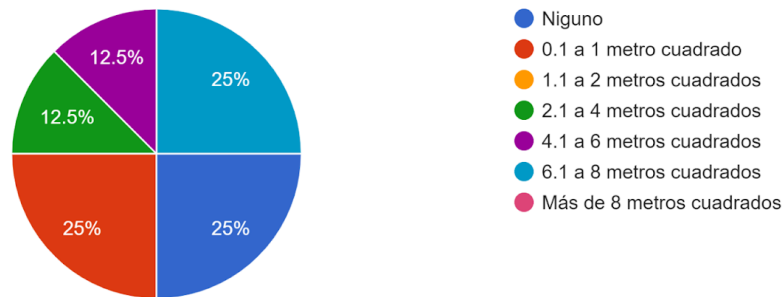
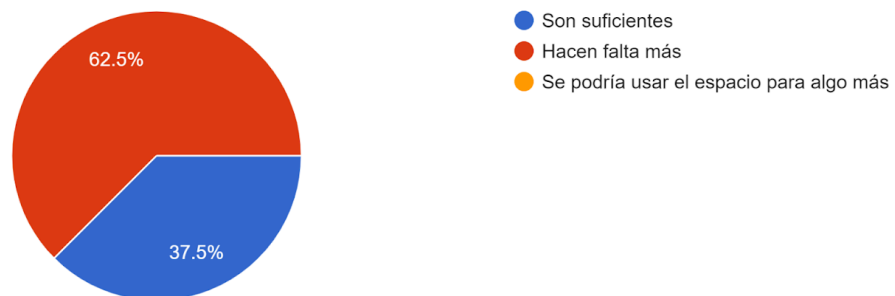


Figura 4.3

Gráfico de cuestionario Santa Fe

¿Qué opina de las áreas verdes que hay en la colonia?
8 respuestas



La mayoría de los encuestados (83.3%) en la colonia El Lago reportó tener vegetación en sus viviendas, siendo las plantas de interior las más comunes (50%). Solo el 16.7% indicó no tener plantas.

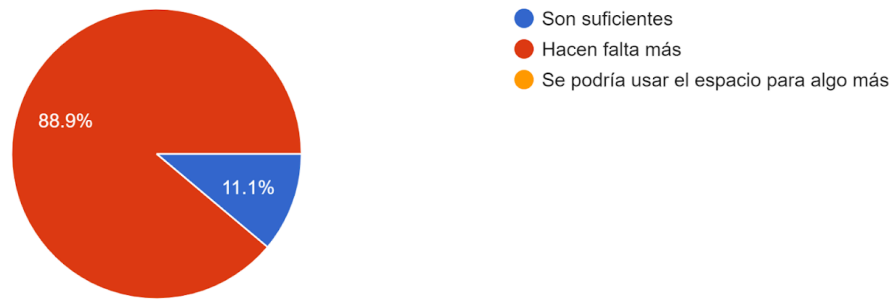
En Santa Fe, las suculentas y las flores fueron las opciones más populares (50% cada una), ya que se permitió seleccionar múltiples opciones. En esta colonia, el 12.5% de los encuestados declaró no tener plantas.

Figura 4.4

Gráfico de cuestionario El Lago

¿Qué opina de las áreas verdes que hay en la colonia?

18 respuestas



Sin embargo, al preguntar sobre los metros cuadrados destinados a la vegetación, la respuesta más frecuente en El Lago (27.8%) fue de 1.1 a 2 metros cuadrados. Esto se observa en la Figura 4.1.

La Figura 4.2 presenta los datos de Santa Fe, donde las respuestas se dividieron en dos categorías con el mismo porcentaje (25%): 6 a 8 metros cuadrados y de 0.1 a 1 metro cuadrado.

Figura 4.5

Gráfico de cuestionario Santa Fe

¿Estaría dispuesto/a en invertir en una casa con un enfoque ecológico o ecotecnologías?

8 respuestas

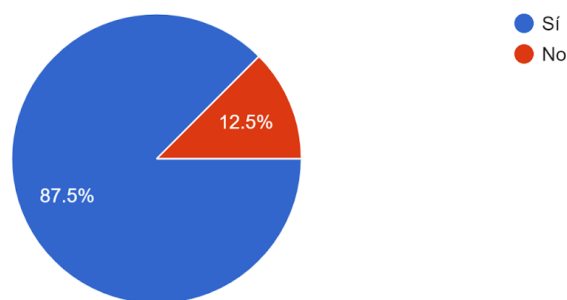
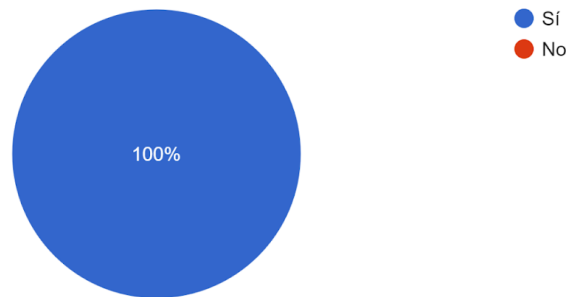


Figura 4.6

Gráfico de cuestionario El Lago

¿Estaría dispuesto/a en invertir en una casa con un enfoque ecológico o ecotecnologías?

18 respuestas



Con respecto a los datos de confort térmico y energéticos, los resultados de las encuestas revelan diferencias entre las colonias El Lago y Santa Fe:

En El Lago, el gasto bimestral promedio en energía eléctrica oscila entre 300 y 600 pesos mexicanos, mientras que en Santa Fe este gasto es mayor, y se sitúa entre 500 y 750 pesos.

La mayoría de los habitantes de ambas colonias perciben sus hogares como calurosos y coinciden en que agosto es el mes más cálido y enero el más frío.

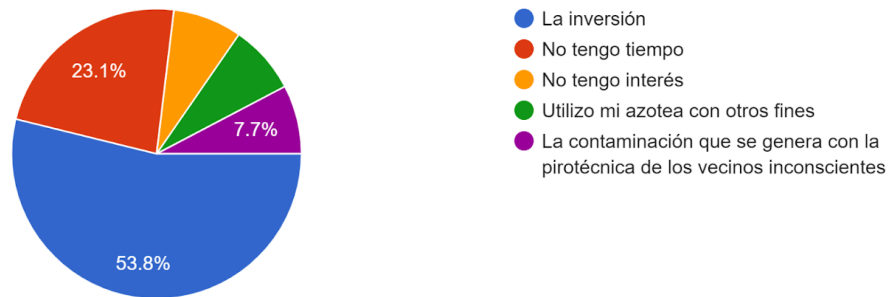
En cuanto a los sistemas de climatización, en El Lago, el 27% de los encuestados utiliza calefacción y el 22% aire acondicionado. Sin embargo, las estrategias más populares para mantener el confort térmico son el uso de ventiladores (61%) y ropa abrigadora en invierno (77%). En Santa Fe, el uso de sistemas de climatización es menor: 25% calefacción y 12.5% aire acondicionado y recurren también a ropa abrigada y ventiladores como principales estrategias.

Figura 4.7

Gráfico de cuestionario El Lago

¿Cuál sería un limitante o barrera por la que no implementaría un proyecto de azotea verde?

13 respuestas



Nota: Elaboración propia

En cuanto a las superficies vegetadas, los cuestionarios revelaron información relevante sobre el uso y la percepción de las áreas verdes en ambas colonias.

En Santa Fe, aunque existen áreas comunes con vegetación, el 50% de los residentes no las utiliza. De los que sí las usan, el 37.5% lo hace dos veces por semana. Además, el 62.5% considera que hacen falta más áreas verdes en la colonia y califican la calidad de las existentes con un promedio de 6.1.

En El Lago, la situación es similar, ya que la mitad de los residentes tampoco utiliza las áreas verdes comunes, mientras que un 33% las utiliza una vez por semana. Al igual que en Santa Fe, los residentes de El Lago consideran que hacen falta más áreas verdes y califican la calidad de las existentes con un promedio de 6.7.

Estos resultados sugieren que, si bien existen áreas verdes en ambas colonias, su uso es limitado y los residentes perciben una falta de espacios verdes de calidad. Incluso consideran que hacen falta más áreas de este tipo, como se visualiza en las Figuras 4.3 y 4.4. Esta información es relevante para el diseño de la propuesta de techos verdes, ya que destaca la necesidad de crear espacios verdes accesibles y atractivos para los residentes en su propio hogar que puedan ser utilizados para diversas actividades como las que se sugieren en la Figura 4.9 y que además contribuyan a mejorar la calidad de vida en las colonias.

Figura 4.8

Gráfico de cuestionario Santa Fe

¿Cuál sería un limitante o barrera por la que no implementaría un proyecto de azotea verde?

8 respuestas

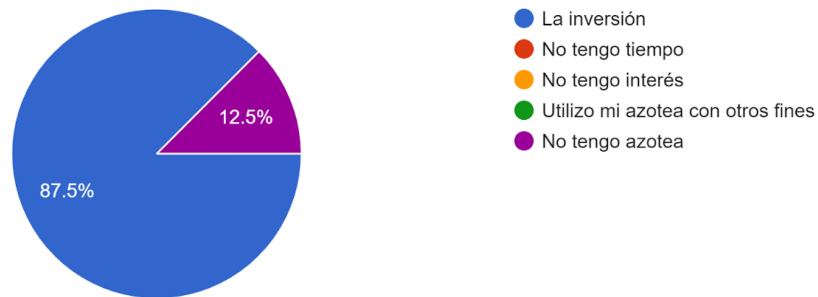
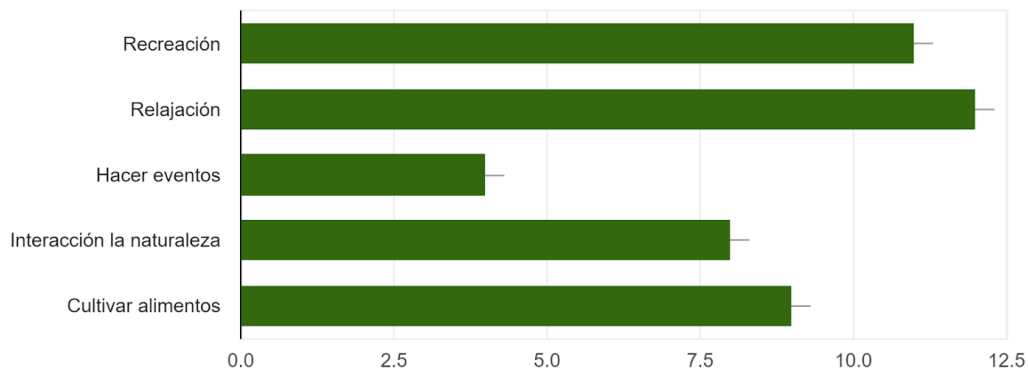


Figura 4.9

Gráfico de cuestionario El Lago

Si en su azotea hubiera áreas verdes ¿Para qué actividades la utilizaría?

18 respuestas



Al preguntar sobre la disposición a invertir en una casa con enfoque ecológico, el 100% de los encuestados en El Lago respondieron afirmativamente. La Figura 4.6 presenta este resultado. El rango de inversión mensual va de 200 a 3000 pesos, siendo 500 pesos la cantidad más popular. De acuerdo con la Figura 4.9, los residentes prefieren un techo verde para actividades de recreación y relajación. Por otro lado, en la Figura 4.10 se observa que el 66.7% desea plantas con flores. Solo el 5.3% se inclina por frutas o verduras, siendo la inversión la principal limitante.

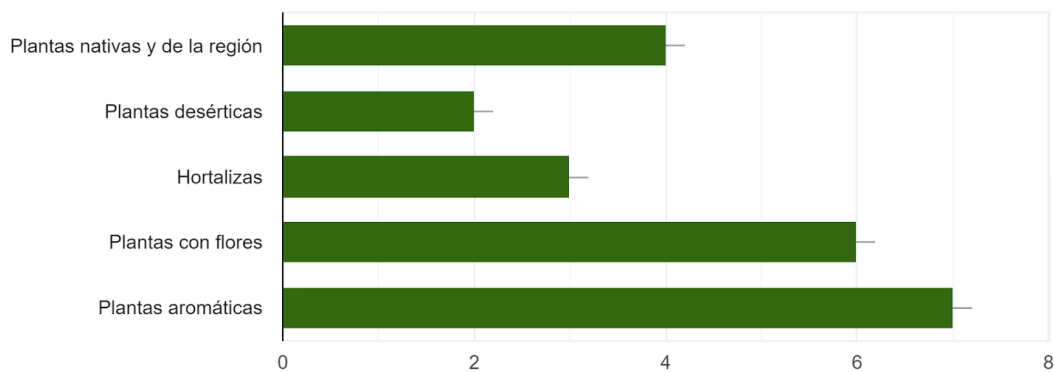
En Santa Fe, como se observa en la Figura 4.5, el 88.5% estaría dispuesto a invertir en una casa ecológica, con una inversión mensual promedio de 780 pesos. Muestran un gran interés en utilizar el techo verde para relajación y cultivo de alimentos, y prefieren plantas aromáticas. La inversión también es la principal barrera para ellos, como se puede ver en las Figuras 4.7 y 4.8.

Figura 4.10.

Gráfico de cuestionario Santa Fe

¿Qué tipo de vegetación quisiera tener en un techo verde?

8 respuestas

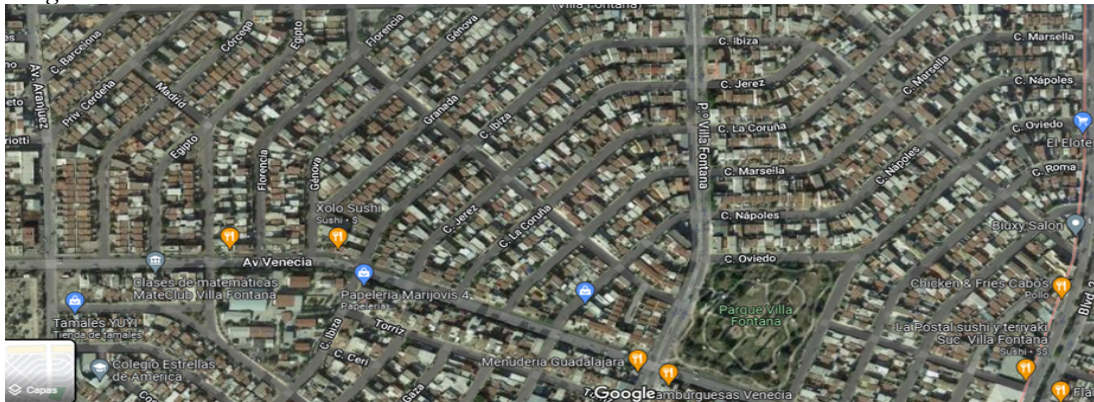


4.1.2 Observación directa

Las Figuras 4.11, 4.12, y 4.13 presentan un análisis inicial a través de imágenes satelitales de Tijuana en Google Maps (hasta el 28 de febrero de 2022), el cual reveló un déficit de áreas verdes en la ciudad. Se seleccionaron las colonias El Lago, Villa Fontana y Santa Fe para la observación directa, debido a su predominancia de viviendas unifamiliares de interés medio.

Figura 4.11.

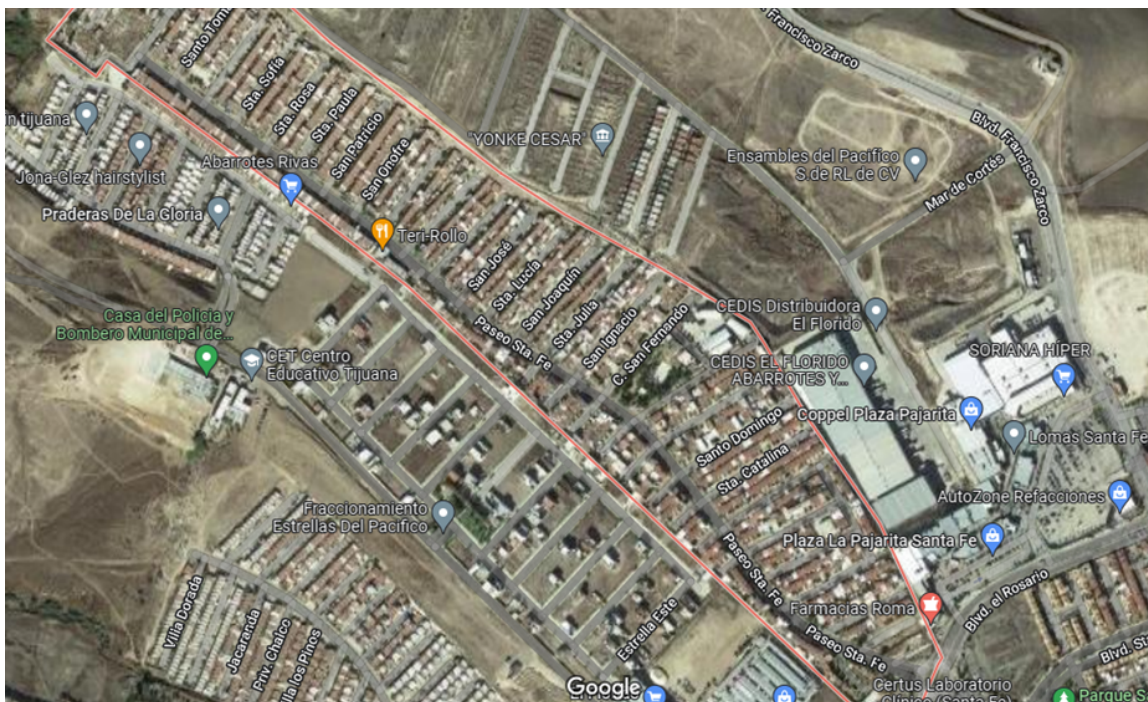
Imagen satelital de la Colonia Villa Fontana Ira Sección



Nota: Recuperado de Google Maps a 28 de febrero de 2022

Figura 4.12

Imagen satelital de la Colonia Santa Fe Ira Sección



Nota: Recuperado de Google Maps a 28 de febrero de 2022

Figura 4.14

Vivienda en colonia El Lago



Figura 4.15

Alambrado cubierto de vegetación



Figura 4.16

Vivienda duplex en El Lago



Figura 4.17

Área verde a la entrada de una privada



Figura 4.18

Vivienda unifamiliar



Las Figuras 4.14, 4.16 y 4.18 muestran viviendas sin vegetación en la parte frontal, con cocheras de concreto y contacto directo con la calle. En contraste, la Figura 4.15 ilustra cómo la vegetación puede brindar privacidad y mejorar el paisaje urbano.

Figura 4.19

Jardín frontal de vivienda



Figura 4.20

Área común de edificio



Figura 4.21

Área común vivienda vertical plurifamiliar



Las Figuras 4.17, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, y 4.24 muestran la variabilidad en la calidad de las áreas verdes comunes. Algunas áreas están bien mantenidas y verdes, mientras que otras carecen de vegetación o presentan un estado de deterioro. Es importante señalar que la observación se realizó durante la temporada de lluvias en Tijuana, lo que podría influir en la apariencia de las áreas verdes.

Figura 4.22

Edificio de departamentos



Figura 4.23.

Reja con vegetación



Figura 4.24

Área verde designada de entrada a una privada



4.1.3 Entrevistas

Las entrevistas realizadas constituyen una valiosa fuente de información complementaria para este trabajo.

Dra. Lina Ojeda

La entrevista con la Dra. Lina Ojeda proporcionó información valiosa sobre la infraestructura verde en Tijuana. Se destacó la importancia de mantener un equilibrio entre especies nativas y exóticas en la vegetación, así como la necesidad de permisos especiales para reproducir y distribuir plantas nativas, por ejemplo la autorización SEMARNAT-08-023-A que permite la extracción legal de especies silvestres. Esto es necesario porque su venta en viveros no autorizados podría provenir de ejemplares extraídos ilegalmente de su hábitat natural.

Desde el punto de vista social, la Dra. Ojeda enfatizó la importancia del acceso a áreas verdes a una distancia máxima de 400 metros de las viviendas, reconociendo las diversas realidades y necesidades de los habitantes de la ciudad. Esto refuerza la necesidad de implementar proyectos que aumenten los metros cuadrados de áreas verdes en Tijuana.

Finalmente, en cuanto a políticas y reglamentos, la Dra. Ojeda señaló un déficit en la normativa actual sobre áreas verdes. Los reglamentos residenciales actuales solo exigen la designación de áreas verdes en función de un porcentaje del área construida, pero no establecen un estándar en metros cuadrados por vivienda. La Dra. Ojeda sugirió que este último enfoque sería más adecuado para garantizar un acceso equitativo a espacios verdes para todos los residentes.

Mtra. Yazmín Ochoa

Esta entrevista se centró en los beneficios socioambientales de la naturalización urbana en Tijuana, y destaca su capacidad para reducir el efecto isla de calor, crear ecosistemas, retener laderas, proporcionar aislamiento acústico y absorber dióxido de carbono. Además, se mencionó que la creación de microecosistemas con vegetación nativa beneficia a diversas especies, como abejas nativas, codornices californianas, colibríes de cabeza roja, aves migratorias y polinizadores.

Lic. Mónica Erandi

La entrevista profundizó en las especies de plantas adecuadas para techos verdes en Tijuana, tanto nativas como de la región. Se discutieron los cuidados necesarios y el proceso de crecimiento de estas especies, y se destacó que las plantas nativas tardan aproximadamente 12 semanas en alcanzar la madurez. Además, se mencionó la posibilidad de limitar el crecimiento de las plantas para adaptarlas al espesor del sustrato disponible.

La licenciada Erandi señaló que la implementación de plantas nativas en techos verdes contribuye a la creación de microecosistemas que benefician a la fauna local y que apoyan la preservación de especies. Sin embargo, recomendó combinar plantas nativas con exóticas no invasivas para proteger las superficies vegetadas de plagas. Algunas de las especies sugeridas para techos verdes incluyen:

- Margarita costera (*Zinnia marítima*) - Nativa
- Arbusto maderista (*Eriogonum fasciculatum*) - Nativa
- Girasol de la costa de California (*Encelia californica*) - Nativa
- Albahaca - Exótica
- Lavanda - Exótica
- Romero (*Salvia rosmarinus*) - Exótica
- Ciruelo silvestre (*Prunus domestica*) - Exótica
- Citronela - Exótica

Finalmente, la Lic. Erandi enfatizó la importancia de que las plantas exóticas no invasivas seleccionadas tengan requerimientos hídricos y de mantenimiento similares a los de las plantas nativas, para asegurar su supervivencia en las condiciones climáticas de Tijuana.

Mtro. Samuel Pérez

La entrevista con Samuel Pérez, experto en agricultura urbana, proporcionó información valiosa sobre el cultivo de alimentos en techos verdes en Tijuana. Pérez destacó que el clima mediterráneo de la ciudad permite el cultivo de diversas hortalizas y hierbas aromáticas,

como col rizada, romero, albahaca, lavanda, zanahoria, berenjena, rábano, cilantro y citronela.

Además, Pérez enfatizó la importancia de la agricultura urbana en la creación de ecosistemas productivos y reguladores de microclimas y resaltó la necesidad de integrar flores como parte de estos agroecosistemas. Señaló que estos cultivos promueven la creación de suelo vivo y ofrecen servicios ecosistémicos como la captación de agua pluvial y la producción de alimentos, siendo los insectos un indicador de la creación de microecosistemas.

En cuanto al mantenimiento, Pérez destacó la importancia de seleccionar cultivos de bajo consumo hídrico y diversificarlos para rotarlos a lo largo del año, adaptándose así a las condiciones climáticas de Tijuana.

Desde una perspectiva cultural, Pérez abogó por cultivar bajo principios agroecológicos y educar a las personas sobre el cuidado de sus alimentos, promoviendo el autoconsumo y el trueque. Finalmente, mencionó que la pandemia impulsó el interés en la agricultura urbana en la ciudad.

Lic. Roberto Huber

En la plática con Roberto Huber se profundizó en los sistemas modulares y su potencial en la industria.

Huber explicó que los sistemas modulares comparten los mismos elementos que los techos verdes tradicionales, pero se clasifican como extensivos debido a su menor profundidad de sustrato. El sistema específico con el que trabaja está fabricado con material EVA, donde cada módulo es una charola con una cuadrícula de ocho espacios para plantas y sustrato. Este material facilita el drenaje, permite que las raíces se compartan y es ideal para plantas de bajo crecimiento que no requieren mucha profundidad de suelo.

En cuanto al impulso de los techos verdes en la industria, Huber identificó tres razones principales:

1. Política pública: Iniciativas que obliguen o incentiven la implementación de techos verdes en edificaciones.

2. Estética: Considerar los techos verdes como parte integral del paisaje urbano, mejorando la apariencia de ciudades y edificios.
3. Conciencia ambiental: Promover el uso de techos verdes como una ecotecnología debido a sus múltiples beneficios ambientales.

4.1.4 Análisis de vegetación ideal para techos verdes en Tijuana

La selección de vegetación para la propuesta se basó en criterios específicos para cada categoría: plantas endémicas, hortalizas y de control biológico.

La Tabla 4.1 presenta las plantas endémicas seleccionadas, y prioriza aquellas de baja altura (hierbas y arbustos) y bajo consumo hídrico, adecuadas para un espesor de sustrato de 10 a 15 cm. Se consideraron especies presentes en la región, utilizadas en el paisajismo local, como *Artemisia californica*, *Oenothera californica*, *Gambelia speciosa* y *Mirabilis laevis*, y que aporten un atractivo estético para los habitantes. La tabla indica si cada especie es nativa o adaptada, lo que ayudará en la configuración del diseño del techo verde.

Tabla 4.1

Plantas nativas y adaptadas de Tijuana

Nombre científico	Tipo de planta	Nativa o adaptada	Requerimiento mínimo anual de agua	Espesor mínimo de sustrato
Ambrosia acanthicarpa	Hierba anual	Nativa	20 cm de precipitación	5 centímetros
Castilleja exserta	Hierba anual	Nativa	23 cm de precipitación	5 centímetros
Datura wrightii	Hierba perenne	Nativa	15 cm de precipitación	5 centímetros
Oenothera californica	Hierba perenne	Nativa	18 cm de precipitación	5 centímetros
Mirabilis laevis	Hierba perenne	Nativa	18 cm de precipitación	5 centímetros
Eriogonum fasciculatum	Arbusto	Nativa	18 cm de precipitación	5 centímetros
Salvia apiana	Arbusto	Nativa	23 cm de precipitación	5 centímetros
Artemisia californica	Arbusto	Nativa	23 cm de precipitación	5 centímetros
Arctostaphylos crustacea	Arbusto	Adaptada	41 cm de precipitación	5 centímetros
Gambelia speciosa	Arbusto	Adaptada	30 cm de precipitación	41 centímetros
Aeonium arboreum	Arbusto	Adaptada	30 cm de precipitación	27 centímetros
Eriogonum arborescens	Arbusto	Adaptada	33 cm de precipitación	25 centímetros
Aegilops cylindrica	Cubre suelo	Adaptada	46 cm de precipitación	5 centímetros
Aeonium haworthii	Arbusto	Adaptada	33 cm de precipitación	5 centímetros
Cynara cardunculus	Hierba perenne	Adaptada	33 cm de precipitación	5 centímetros

Nota: basada en Calflora (2022) y The California Native Plant Society (2022)

Asimismo, se consideraron especies de vegetación similares a las que se utilizan comúnmente en el paisajismo de la ciudad, dado que la superficie vegetada también cumple una función estética. Se buscó seleccionar plantas atractivas para los habitantes, como *Artemisia californica*, *Oenothera californica*, *Gambelia speciosa* y *Mirabilis laevis*. Algunas de estas especies se pueden apreciar en la Figura 4.25, que ilustra sus aspectos ornamentales.

Figura 4.25

a) *Artemisia californica* b) *Oenothera californica* c) *Gambelia speciosa* d) *Mirabilis laevis*



Nota: Imagen recuperada de a) Gonsman, 2018, b) Riend, 2006, c) McDougall, 2020, d) Norris, 2016

Para el análisis de selección de cultivos, se establecieron criterios primarios y secundarios. Los criterios primarios, basados en la metodología de Minke (2010), fueron el requerimiento de agua y el espesor de sustrato necesario. Dada la escasez de agua en Tijuana, se priorizaron cultivos con bajo consumo hídrico. El espesor máximo de sustrato se limitó a 25 cm, ya que,

según la revisión del estado del arte, existen sistemas que con este espesor mantienen un peso inferior a los 100 kg/m², el límite de carga viva establecido por el reglamento de construcción en Baja California.

Se evaluaron hortalizas que crecen óptimamente en este espesor de sustrato y se consideró la adaptabilidad del sistema para distribuir los cultivos según sus requerimientos específicos en la etapa de diseño.

Tabla 4.2

Selección de cultivos para el techo verde en Tijuana

Cultivo	Requerimiento de agua	Producción (kg/m²/año)	Espesor de sustrato (cm)	Temporada de siembra
Cebolla	Escaso	5.6	20	Otoño e invierno
Berenjena	Sin exceso (96 L/mes/m ²)	3.3	25	Otoño
Judía	Sin exceso	1.8	25	Verano
Rábano	Suelo húmedo (150L/mes/m ²)	1.7	10	Otoño y primavera
Espinaca	Suelo húmedo	1.7	10	Todo el año
Haba	Sin exceso	0.9	25	Invierno
Guisante	Sin exceso (60L/mes/m ²)	0.7	15	Otoño
Frijol	Suelo húmedo	0.6	5	Verano
Salvia*	Sin exceso	0.16	25	Primavera
Lavanda*	Una vez por semana	0.14	10	Otoño

Nota: Información recuperada de Agromatica.es (2022) * Plantas de control biológico

Asimismo, se consideraron como criterios secundarios la producción y la temporada de siembra, con el objetivo de seleccionar cultivos que ofrezcan un buen rendimiento por metro cuadrado y satisfagan las necesidades alimenticias de la familia durante todo el año. Este enfoque permite abordar otros Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), al tiempo que se asegura que el diseño del sistema pueda proveer alimento en todas las estaciones. Es importante destacar que la temporada de siembra indicada en la Tabla 4.2 refleja las condiciones climáticas específicas de Tijuana, que corresponden a un clima mediterráneo.

Además de los criterios mencionados, se evaluaron otros requerimientos establecidos por Minke (2010) para asegurar que todas las especies seleccionadas puedan desarrollarse adecuadamente en las condiciones de Tijuana:

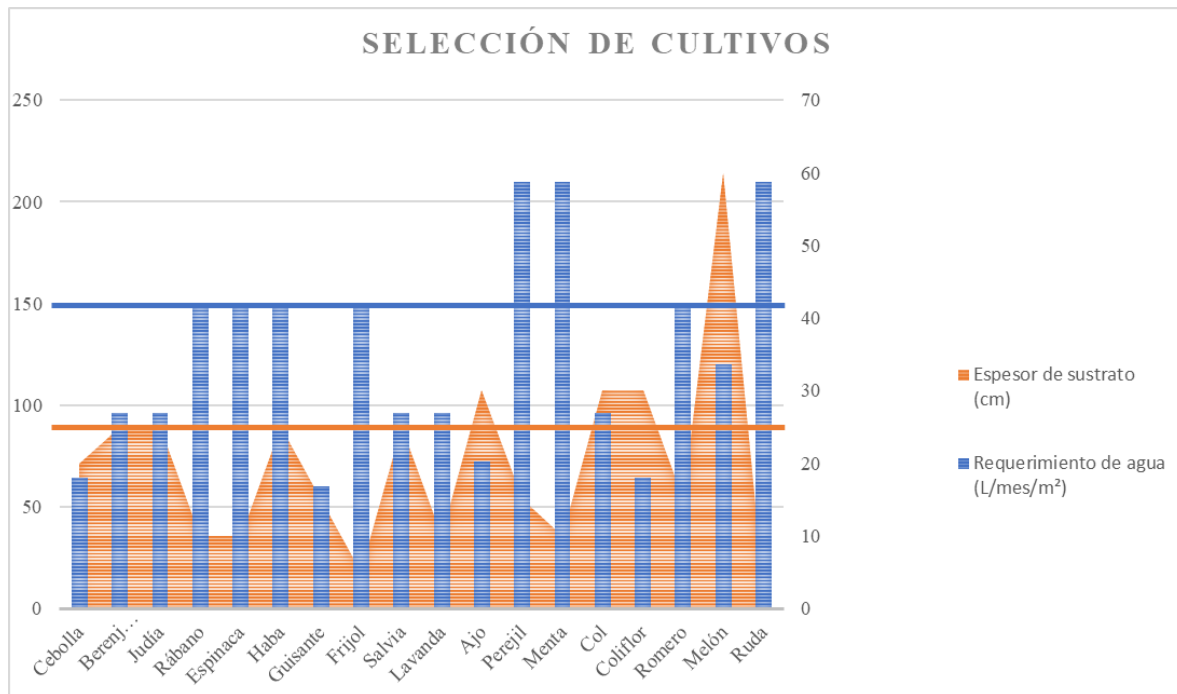
- Exposición total al sol y capacidad para soportar la radiación solar.
- Adaptabilidad a cualquier orientación.
- Funcionamiento en techos con una inclinación del 2%, según lo establecido por el reglamento para el drenaje del agua.
- Tolerancia a la precipitación media anual de Tijuana, que es de 200 mm.

Con base en estos criterios, se realizó un filtrado en Excel de la información recopilada en la Tabla 2.3 para identificar las especies más adecuadas. El resultado se presenta en la Tabla 4.2, donde los cultivos están ordenados de mayor a menor beneficio. Se descartaron aquellos que no cumplían con los requisitos de bajo consumo de agua y un espesor máximo de sustrato de 25 cm.

La Figura 4.26 ilustra gráficamente el proceso de filtrado y muestra los cultivos que se encuentran por debajo de los límites establecidos para el espesor de sustrato y el consumo hídrico.

Figura 4.26

Gráfico de selección de cultivos para el techo verde



De acuerdo con el gráfico de la Figura 4.26, los cultivos ideales para techos verdes en Tijuana son cebolla, berenjena, judía, guisante, salvia y lavanda. Aunque el gráfico incluye rábano, espinaca, haba, frijol y romero, estos fueron descartados en el diseño de la propuesta, ya que no cumplían con los requisitos de bajo consumo hídrico establecidos en la Tabla 2.3.

4.1.5 Análisis de sustrato para retención de humedad

Se inició un experimento para medir la retención de humedad de diferentes sustratos bajo las condiciones climáticas otoñales de Tijuana. Las Figuras 4.27, 4.28 y 4.29 muestran los recipientes y materiales utilizados. Se utilizaron macetas de 13 cm de alto y 14.5 cm de diámetro.

Esta primera ronda de pruebas reveló características importantes sobre el comportamiento de los materiales, lo que permitirá ajustar las proporciones en futuras etapas de investigación e identificar los materiales más efectivos en la retención de humedad.

Figura 4.27

Materiales del experimento



Figura 4.28

Medición 75% tierra para maceta de 13cm



Durante la experimentación en la temporada de otoño, bajo condiciones climáticas de temperaturas máximas de 24°C, mínimas de 6°C y ráfagas de viento en Tijuana, se evaluó la retención de humedad de diferentes sustratos. Se utilizó una maceta de control con 100% tierra como referencia para el peso y la comparación de la retención de humedad.

La Tabla 4.3 muestra la variación de la humedad en una escala de 10 (más húmedo) a 1 (seco). Las mediciones se realizaron diariamente con un higrómetro hasta que cada sustrato regresó a las condiciones iniciales (Día 0).

Figura 4.29

Recipientes con perlita, tierra, hidrogel y paja



Los hallazgos de la primera ronda de experimentación revelan que:

- La paja es un material ligero y económico que mejora significativamente la retención de humedad en el sustrato.
- La perlita contribuye mínimamente a la retención de humedad y, en las etapas finales del experimento, presenta condiciones similares a la tierra abonada.
- El hidrogel actúa como una esponja, absorbiendo y liberando agua gradualmente para mantener la humedad del sustrato. Su nivel de humedad fluctúa, pero no disminuye de manera significativa.

Tabla 4.3

Mediciones de humedad de la primera ronda de experimentación en donde 10 indica más húmedo y 1 menos húmedo

Otoño (11 noviembre 2022)	Humedad											
	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	
Sustrato												
Control 100% Tierra	1	9	8	5	5	3.5	3.5	2	1.5	2.5	1	
Paja 25% + Tierra 75%	1.5	10+	9	8	6.5	6	6.5	3	3.5	3	3	
Paja 12.5% + Hidrogel 12.5%+ Tierra 75%	1.5	10	8.5	7	5	4.5	4	3	3.5	4	4	
Hidrogel 25% + Tierra 75%	1	10+ (A) 1(F)	10(A) 2 (F)	9 (A) 3 (F)	8 (A) 5 (F)	8(A) 7(F)	9(A) 7(F)	7(A) 4.5(F)	8.5 (A) 6(F)	8(A) 6(F)	4.5 (A) 6 (F)	
Hidrogel 2% + Tierra 98%	1	9	7.5	7.5	6.5	6	5	3.5	4	3.5	2	
Perlita 25% + 75%	1	9	7.5	6	5	3	3	2	2	2	1.5	

Una observación importante sobre el hidrogel es que el riego desde la superficie provoca que el material en la parte superior absorba agua, lo que impide que llegue a las capas inferiores. Con el tiempo, el fondo se humedece gradualmente, como se observa en la tabla, donde en la línea correspondiente a Hidrogel 25% + Tierra 75% la nomenclatura (A) corresponde a la parte superior de la mezcla (Arriba) y (F) representa la parte inferior (Fondo). Como se puede observar, los primeros días la diferencia entre la parte superior y el fondo es muy marcada, y conforme pasan los días, esta brecha de humedad se va reduciendo.

La combinación de hidrogel y paja no tuvo el rendimiento esperado según los resultados individuales de cada material. Esto sugiere que futuras experimentaciones deberían probar diferentes proporciones de estos materiales, que individualmente demostraron buenas características.

Tabla 4.4

Pesos saturados del sistema por cada sustrato

Volumen recipiente (m³)	0.002147	Volumen Live Roof (m³)	0.12	por metro cuadrado	Volumen 20 cm (m³)	0.12	por metro cuadrado
Sustrato	Masa total (g)	Masa saturada con 500ml de agua (g)	Recipiente (kg/m³)	Live Roof 12 cm espesor (kg/m²)	Live Roof 20 cm espesor (kg/m²)	Carga distribuida con tezonle de 12 cm (kg/m²)	Carga distribuida con tezonle de 20 cm (kg/m²)
Control 100% Tierra	1320	1574.7	733.55	88.03	146.71	78.02	126.92
Paja 25% + Tierra 75%	1024.6	1507.9	702.43	84.29	140.49	74.91	121.74
Paja 12.5% + Hidrogel 12.5%+ Tierra 75%	1179.3	1665	775.38	93.05	155.08	82.20	133.90
Hidrogel 25% + Tierra 75%	1398.7	1890.8	880.80	105.70	176.16	92.75	151.47
Hidrogel 2% + Tierra 98%	1016.3	1576.6	734.43	88.13	146.89	78.11	127.07
Perlita 25% + 75%	1108.8	1595.9	743.42	89.21	148.68	79.01	128.57

En la Tabla 4.4 se puede observar un factor importante: el peso saturado de cada sustrato. Este dato es clave para determinar cuál sustrato funciona mejor con el sistema modular

seleccionado ya que prioriza la ligereza. Además, es fundamental considerar el peso por metro cuadrado en la carga distribuida. En el ejemplo de la tabla, se consideran 40 m² de techo verde y 8 m² de tezontle, con un peso de 28 kg/m².

En la segunda ronda de experimentación, se ajustaron las proporciones de los sustratos con base en los resultados del otoño. La Tabla 4.5 muestra las nuevas combinaciones y el peso total del sistema, incluyendo el peso del sustrato y otros elementos. Se incorporó GROW, un sustrato más ligero y rico en nutrientes, en sustitución de la tierra convencional para reducir el peso total del sistema.

Tabla 4.5

Pesos saturados total del sistema por cada sustrato.

Volumen recipiente (m ³)	0.00214	Volumen	0.12	por metro	Volumen 20	0.12	por metro cuadrado			
		Masa saturada con 500ml de agua	Recipiente	Sustrato 12 cm espesor	Sustrato 20 cm espesor	Carga distribuida con tezontle de 12 cm	Carga distribuida con tezontle de 20 cm	Peso neto del sistema	Peso estimado vegetación 12 cm	Peso completo del techo verde
Sustrato	Masa te	(g)	(kg/m ³)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)
Control 100% Tierra	919.7	1414.4	658.87	79.06	131.77	70.55	114.48	9.76	40	128.82
Paja 25% + Tierra 75%	1024.6	1507.9	702.43	84.29	140.49	74.91	121.74	9.76	40	134.05
Paja 50% + Tierra 50%	467.3	960	447.20	53.66	89.44	49.39	79.20	9.76	40	103.42
Grow 50% + Tierra 50%	783.4	1280.2	596.36	71.56	119.27	64.30	104.06	9.76	40	121.32
Grow 25% + Paja 25% + Tierra 50%	692.6	1186.5	552.71	66.33	110.54	59.94	96.79	9.76	40	116.09
Hidrogel 25% + Paja 25% + Tierra 75%	893.7	1389.5	647.28	77.67	129.46	69.39	112.55	9.76	40	127.43
Hidrogel 15% + Tierra 85%	988	1477.5	688.27	82.59	137.65	73.49	119.38	9.76	40	132.35
Grow 100%	520	1018.4	474.40	56.93	94.88	52.11	83.73	9.76	40	106.69

Los resultados de las mediciones realizadas durante diez días en invierno, bajo condiciones de lluvias atípicas en la región, revelaron diferencias en el comportamiento de los sustratos. La paja mostró una menor capacidad de retención de humedad en comparación con el otoño, debido a que el exceso de agua comenzó a escurrir. En contraste, el hidrogel mantuvo la humedad prácticamente al 100%, lo que sugiere que el sistema de riego podría no ser necesario durante la temporada de lluvias (Tabla 4.6).

Tabla 4.6

Mediciones de humedad de la segunda ronda de experimentación

Invierno (18 febrero 2023)	Humedad										
	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Sustrato											
Control 100% Tierra	3	10	8.5	7	7	8	8.5	7.5	8	7	5
Paja 25% + Tierra 75%	4	9.5	9	7.5	7	8	8	7.5	9	7	4.5
Paja 50% + Tierra 50%	2	9	8	8	7.5	9	8	8	8	8	4.5
Grow 50% + Tierra 50%	2	10	8	8	8	9	8	8.5	8	4	
Grow 25% + Paja 25% + Tierra 50%	2.5	10	9	9	9	10	9.5	9	9	8.5	5
Hidrogel 25% + Paja 25% + Tierra 75%	1	10	10	9	9	10	10	9	10	10	9.5
Hidrogel 15% + Tierra 85%	1	10	10	8	8	10	10	10	10	10	9.5
Grow	-	-	-		10	9	9	8.5	8.5	8	5.5
Temperatura (°C)	12	11	13	14	12	10	11	12	10	10	11
Precipitación (mm)	0	1.8	0	0	2.1	11	3.8	1.2	36	4.3	1.1

Finalmente, se realizó una experimentación con las dos combinaciones de materiales y sustratos que obtuvieron los mejores resultados, con el objetivo de observar su comportamiento durante la primavera. En la Tabla 4.7 se puede apreciar cómo el hidrogel y la paja se combinan con el sustrato GROW para lograr una mezcla más ligera y con buenas propiedades de retención de humedad.

Tabla 4.7

Pesos saturados total del sistema por cada sustrato.

Volumen recipiente (m³)	0.002147	Volumen Live Roof (m²)	0.12	por metro cuadrado	Volumen 20 cm (m³)	0.12	por metro cuadrado			
Sustrato	Masa total (g)	Masa saturada con 500ml de agua (g)	Recipiente (kg/m²)	Sustrato saturado 12 cm espesor (kg/m²)	Sustrato saturado 20 cm espesor (kg/m²)	Carga distribuida con tezonle de 12 cm (kg/m²)	Carga distribuida con tezonle de 20 cm (kg/m²)	Peso neto del sistema (kg/m²)	Peso estimado vegetación 12 cm (kg/m²)	Peso completo del techo verde (kg/m²)
Grow 90% + Hidrogel 10%	634	1130	526.39	63.17	105.28	57.31	92.40	9.76	40	112.93
Paja 25% + Grow 75%	520	1015	472.82	56.74	94.56	51.95	83.47	9.76	40	106.50

En la Tabla 4.8 se observa que las dos combinaciones de sustratos tienen comportamientos similares en cuanto a la retención de humedad, aunque la mezcla de GROW e hidrogel presenta una ligera ventaja. Es importante destacar que este sustrato ha demostrado un rendimiento eficiente en todas las temporadas de experimentación.

Tabla 4.8

Mediciones de humedad de la tercera ronda de experimentación

Primavera (10 de abril de 2023)	Humedad										
	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Sustrato											
Grow 90% + Hidrogel 10%	1	10	10	9.5	9	8	7	6.5	6	5	5
Grow 75% + Paja 25%	1.5	10	9.5	9	8	7	6.5	6	6	5	4
Temperatura (°C)	14	14	13	12	13	13	13	13	14	16	19
Precipitación (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.2 Hallazgos aprovechables

Los instrumentos metodológicos empleados en esta investigación permitieron obtener hallazgos relevantes en relación con las categorías principales del estudio.

En primer lugar, se identificó un interés por parte de los usuarios en implementar sistemas de naturación en sus hogares, como lo demuestran las respuestas obtenidas en los cuestionarios, la información proporcionada por el experto Samuel Pérez y la presencia de vegetación en algunos casos observados en sitio. Sin embargo, tanto las entrevistas como los cuestionarios revelaron que la inversión inicial para superficies vegetadas sigue siendo una limitante para la adopción de esta estrategia. Se requiere una comprensión más profunda de la percepción de los usuarios sobre los costos y la viabilidad de estas soluciones.

Existe consenso entre los expertos sobre los tipos de plantas viables para techos verdes en Tijuana, aunque las preferencias de los encuestados varían y no siempre coinciden con las recomendaciones de los especialistas.

La revisión de antecedentes sobre superficies vegetadas mostró una amplia variedad de sistemas disponibles, adaptables a diferentes climas, características de edificación y tipos de vegetación. Estos sistemas también pueden variar en diseño, funcionalidad y estética.

La innovación en sistemas de techos verdes debe enfocarse en reducir costos, peso y mejorar los materiales de construcción. A pesar de la existencia de diversos sistemas modulares, su implementación sigue siendo un desafío para gran parte de la población. Por lo tanto, es crucial explorar soluciones financieras que hagan esta ecotecnología más accesible y ampliamente utilizada en Tijuana.

La carga del techo verde representa un factor decisivo para seleccionar tanto el sistema como el sustrato. Como se estableció en la Sección 2.1.1, la normativa exige que la cubierta soporte una carga viva de 100 kg/m^2 , por lo que la instalación debe mantenerse por debajo de este umbral. La experimentación demostró que un sistema mixto de huerto en casa y plantas nativas, combinado con andadores de tezontle, puede reducir el peso al distribuir la carga. Es

posible iterar con diferentes combinaciones y proporciones para optimizar el uso de la superficie del techo.

La experimentación también reveló que el hidrogel es el material más efectivo para la retención de humedad. Una proporción inferior al 20% en volumen mejora significativamente la retención de humedad del sustrato sin aumentar considerablemente el peso. Durante la temporada de lluvias, el hidrogel mantiene una humedad del 100%, lo que podría eliminar la necesidad de riego en ese período.

La combinación de hidrogel con GROW, un sustrato más ligero que la tierra abonada, ofrece un equilibrio entre peso y propiedades de retención de humedad, lo que crea condiciones ideales para el crecimiento de hortalizas y plantas desérticas.

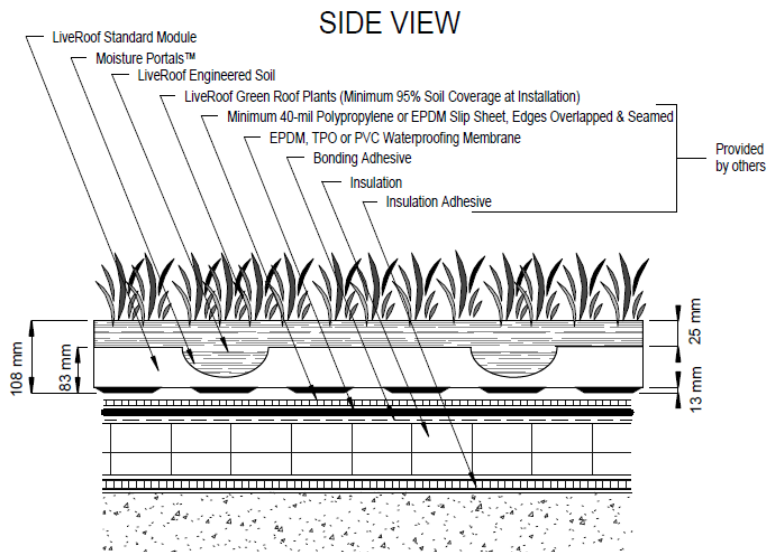
4.3 Diseño aplicativo de la solución

4.3.1 Selección de sistema constructivo

En la Tabla 2.1 se comparan varios sistemas competitivos. Sin embargo, muchos no están disponibles en México, lo que implica importación y mayores costos, siendo una limitante para acceder al financiamiento de Hipoteca Verde. Por lo tanto, la selección se redujo a los sistemas disponibles en México: LiveRoof y Ecotelhado.

Figura 4.30

Vista lateral del módulo Live Roof

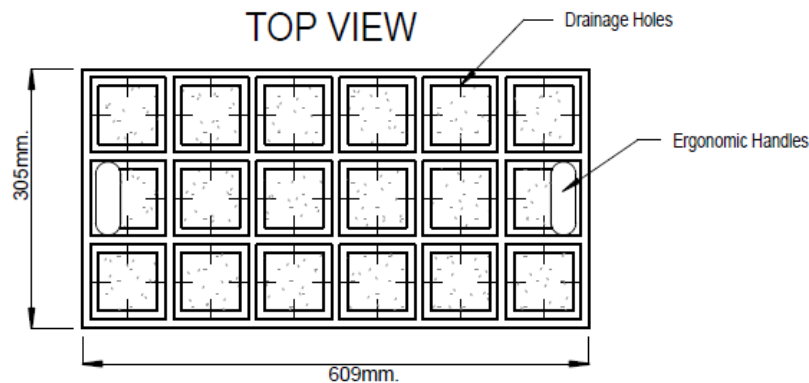


Nota: Recuperada de la ficha técnica Live Roof

Se seleccionó el sistema LiveRoof (Figuras 4.30 y 4.31) debido a su costo, dimensiones y al material de los módulos, que es polipropileno reciclado. Sin embargo, presenta un inconveniente: su peso saturado, según la ficha técnica, supera el límite para evitar adecuaciones estructurales en viviendas existentes, lo que dificulta su implementación sin intervenciones. Por lo tanto, es necesario seleccionar un sustrato más ligero que la tierra, ya que la literatura sugiere que la combinación de sustratos puede reducir la carga total.

Figura 4.31

Vista superior del módulo Live Roof



Nota: Recuperada de la ficha técnica Live Roof

El sistema LiveRoof utiliza riego por goteo para reducir el consumo de agua, una técnica de agricultura sostenible (Shock & Welch, 2013). Este método minimiza el contacto con el follaje y los tallos, lo que favorece la salud de las plantas y reduce la pérdida de agua por evaporación.

4.3.2 Selección de especies

Las especies seleccionadas para el diseño de la solución se dividen en plantas ornamentales y cultivos, con el fin de presentar dos sistemas que se adapten a las necesidades y requerimientos de mantenimiento de los usuarios.

Se contempló un espacio de 48 m² en la azotea para distribuir las especies y para buscar maximizar los beneficios para los usuarios. Las plantas ornamentales seleccionadas son: *Artemisia californica*, *Oenothera californica*, *Gambelia speciosa* y *Mirabilis laevis*. Los cultivos elegidos son: guisante, judía, haba, cebolla y berenjena, con salvia y lavanda como plantas de control biológico.

El diseño del techo verde incorpora andadores de tezontle para facilitar el mantenimiento del sistema. Este material fue seleccionado por su ligereza y propiedades de aislamiento térmico. El corredor tiene 8 m de largo por 1 m de ancho y ocupa 8 m² de la superficie de la azotea.

4.3.3 Selección de sustrato

El sustrato seleccionado para la solución está compuesto por 90% GROW + 10% hidrogel, se determinó tiene las mejores características retención de humedad, durabilidad y nutrientes que son ideales para el clima en Tijuana, así como para lo que se busca en el sistema modular de techos verdes.

Además, es importante mencionar que el hidrogel tiene la característica de tener una vida útil de 3 a 5 años, lo que hace que la frecuencia de su mantenimiento y reemplazo sea menor con respecto a la de la paja que se había considerado.

Sin embargo, la combinación de 75% GROW + 25% paja se puede utilizar en una primera instancia para la inversión inicial o en caso de que se complique la obtención del hidrogel para su sustitución al fin de la utilidad.

4.4 Factibilidad y validación

4.4.1 Validación de costos del techo verde

En el análisis costo-beneficio, se consideraron dos escenarios posibles con el sistema modular seleccionado, la vegetación y el sustrato previamente establecidos. Esto permite tener una visión completa de las implicaciones económicas de la propuesta y, con base en ello, tomar una decisión informada.

Inversión

El primer escenario plantea un techo verde extensivo con una vida útil de 20 años, que utiliza plantas de bajo consumo hídrico que requieren riego semanal, como suculentas y cactáceas. El segundo escenario propone un techo verde intensivo con la misma vida útil, pero destinado a un huerto en casa.

Ambos escenarios consideran una azotea de 48 metros cuadrados con capacidad para soportar un peso de 120 kg/m². Superar este límite requeriría adecuaciones estructurales, según la reglamentación vigente. Se determinó que 8 m² se cubrirán con tezontle, con un peso de 28

kg/m² y un espesor de 5 cm, según las especificaciones de venta en Home Depot. A partir de estos datos, se calcula un promedio del peso saturado de cada sistema, el cual considera los pesos y espesores determinados en la sección 4.1.5.

Tabla 4.9

Inversión inicial del escenario 1

Escenario 1	Costo unitario	Cantidad	Costo total
Sistema modular Live Roof	\$ 578.00	40	\$23,120.00
Cactáceas por m ²	\$ 56.00	20	\$ 1,120.00
Suculentas por m ²	\$ 98.00	20	\$ 1,960.00
Sustrato tierra por m ³	\$ 1,700.00	5	\$ 8,500.00
Paja por m ³	\$ 350.00	5	\$ 1,750.00
Tezontle	\$ 119.00	8	\$ 952.00
Impermiabilizante	\$ 3,875.32	1	\$ 3,875.32
Escaleras prefabricadas	\$ 10,992.00	1	\$10,992.00
Inversión	\$		52,269.32

Las Tablas 4.9 y 4.10 muestran la inversión inicial para los dos escenarios y toma en cuenta solo los materiales necesarios para implementar el sistema. El costo promedio por semilla o plántula se incluye en el caso de la vegetación. En el escenario 2, el sustrato es más costoso debido al mayor espesor requerido (20 cm) y también aumentan los costos de impermeabilización y detalles estructurales por el incremento de peso.

Tabla 4.10

Inversión inicial del escenario 2

Escenario 2	Costo	Cantidad	Costo total
Sistema modular Live Roof	\$ 578.00	40	\$ 23,120.00
Plantas comestibles por m ²	\$ 187.00	40	\$ 7,480.00
Sustrato por m ³	\$ 1,700.00	8	\$ 13,600.00
Paja por m ³	\$ 350.00	8	\$ 2,800.00
Tezontle	\$ 119.00	8	\$ 952.00
Escaleras prefabricadas	\$10,992.00	1	\$ 10,992.00
Impermiabilizante	\$ 5,812.98	1	\$ 5,812.98
Inversión	\$		64,756.98

Las Tablas 4.11 y 4.12 incorporan nuevas variables necesarias para la implementación del análisis financiero de azoteas verdes en viviendas. Se añade el costo del sistema de riego y la preparación de la conexión hidráulica al techo. Además, se sustituye la tierra abonada por GROW para reducir el peso saturado de la cubierta.

Tabla 4.11

Inversión inicial del escenario 1 con modificaciones

Escenario 1	Costo unitario	Cantidad	Costo total
Sistema modular Live Roof	\$ 578.00	40	\$23,120.00
Cactáceas por m ²	\$ 56.00	20	\$ 1,120.00
Suculentas por m ²	\$ 98.00	20	\$ 1,960.00
Sustrato grow por m ³	\$ 4,550.00	4	\$18,200.00
Paja por m ³	\$ 350.00	5	\$ 1,750.00
Tezontle	\$ 119.00	8	\$ 952.00
Impermiabilizante	\$ 3,875.32	1	\$ 3,875.32
Escaleras prefabricadas	\$ 10,992.00	1	\$10,992.00
Sistema de riego por m ²	\$ 68.00	40	\$ 2,720.00
Regulador de riego	\$ 1,052.00	1	\$ 1,052.00
Preparación a la azotea	\$ 2,000.00	1	\$ 2,000.00
Inversión	\$		67,741.32

Tabla 4.12

Inversión inicial del escenario 2 con modificaciones

Escenario 2	Costo	Cantidad	Costo total
Sistema modular Live Roof	\$ 578.00	40	\$ 23,120.00
Hortalizas por m ²	\$ 187.00	40	\$ 7,480.00
Sustrato grow por m ³	\$ 4,550.00	7	\$ 31,850.00
Paja por m ³	\$ 350.00	8	\$ 2,800.00
Tezontle	\$ 119.00	8	\$ 952.00
Escaleras prefabricadas	\$10,992.00	1	\$ 10,992.00
Impermiabilizante	\$ 5,812.98	1	\$ 5,812.98
Sistema de riego por m ²	\$ 68.00	40	\$ 2,720.00
Regulador de riego	\$ 1,052.00	1	\$ 1,052.00
Preparación a la azotea	\$ 2,000.00	1	\$ 2,000.00
Inversión	\$		88,778.98

Costos de mantenimiento

En el análisis costo-beneficio, se utilizaron los datos de consumo de una vivienda como ejemplo. Es importante destacar que los ahorros energéticos significativos se observan principalmente en viviendas con sistemas de climatización, como el aire acondicionado.

La vivienda de ejemplo se encuentra en tarifa de alto consumo (DAC), donde el costo por kilowatt-hora es mayor. La implementación de un techo verde ayudaría a disminuir el consumo energético y, por lo tanto, el costo del recibo de electricidad al cambiar a una tarifa más baja.

Tabla 4.13

Gastos actuales de una vivienda muestra

Gastos actuales	
Gasto energético AC	
Costo del kWh	\$ 5.22
Tiempo de uso diario (horas)	6
Días al año	100
Potencia (kW) del AC	1.95
Cantidad de AC	2
Gasto anual	\$ 12,214.80
Impermeabilización	
Costos cubeta	\$ 1,495.15
Cantidad de metros cuadrados por cubeta	28.5
Cubetas necesario	2
Gasto cada 5 años	\$ 2,990.30

Los valores presentados en la Tabla 4.13 reflejan los gastos actuales de la vivienda de ejemplo, en particular el uso de aire acondicionado e impermeabilización de la azotea cada 5 años, aspectos que se verán afectados por la implementación de la cubierta vegetada.

Los gastos futuros asociados a la implementación del techo verde incluyen el consumo de agua. Se toma como referencia el costo del metro cúbico de agua a 24.41 pesos, según la tabla de costos de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT) a octubre de 2022, ya que este es el costo que aplica después del consumo mínimo de 5 m³.

En el escenario 1 (Tabla 4.14), el gasto por excedente de agua se calcula para ocho meses, considerando que durante cuatro meses del año la lluvia cubre las necesidades de riego de las plantas nativas.

En el escenario 2 (Tabla 4.15), se considera el consumo hídrico anual de cada cultivo durante diez meses, ya que la precipitación complementa el riego necesario en los meses restantes.

Tabla 4.14

Gastos futuros al implementar escenario 1

Gastos futuros	
Consumo agua	
Costo metro cúbico	\$ 24.41
Consumo de agua mensual en metros cúbicos*	1.44
Cantidad de meses	8
Gasto anual	\$ 281.20
Impermeabilización	
Costos cubeta	\$ 1,937.66
Cantidad de metros cuadrados por cubeta	25.5
Cubetas necesario	2
Gasto cada 15 años	\$ 3,875.32

Tabla 4.15

Gastos futuros al implementar escenario 2

Gastos futuros	
Consumo agua	
Costo metro cúbico	\$ 24.41
Consumo de agua mensual en metros cúbicos	4.43
Cantidad de meses	10
Gasto anual	\$ 1,081.36
Impermeabilización	
Costos cubeta	\$ 1,937.66
Cantidad de metros cuadrados por cubeta	19
Cubetas necesario	3
Gasto cada 15 años	\$ 5,812.98

La Tabla 4.16 presenta los beneficios económicos potenciales de tener un huerto en la azotea, basados en el diseño propuesto y los metros cuadrados asignados a cada cultivo. Es relevante

destacar que no se incluye el costo de mantenimiento, ya que se asume que el habitante puede realizarlo haciendo uso de prácticas agroecológicas.

Tabla 4.16

Análisis de costo - beneficio del huerto en azotea

Cultivo	Superficie (m ²)	Requerimiento de agua anual (Litros)	Gasto anual agua (Pesos)*	Producción anual (kg)	Costo del kg (Pesos)	Beneficio
Cebolla	8	6144	\$ 149.98	44.8	\$ 19.00	\$ 851.20
Berenjena	6	6912	\$ 168.72	19.8	\$ 72.00	\$ 1,425.60
Judía	6	6912	\$ 168.72	10.8	\$ 30.90	\$ 333.72
Haba	6	10800	\$ 263.63	5.4	\$ 40.00	\$ 216.00
Guisante	6	4320	\$ 105.45	4.2	\$ 72.00	\$ 302.40
Salvia	4	4608	\$ 112.48	0.64	\$ 183.00	\$ 117.12
Lavanda	4	4608	\$ 112.48	0.56	\$ 768.00	\$ 430.08
Total	40	44304	\$ 1,081.46	86.2	\$ 1,184.90	\$ 3,676.12

Asimismo, es importante mencionar que el costo del kilogramo de cada alimento se obtuvo del precio de mercado en octubre de 2022. Los valores de los beneficios podrían variar según la temporada.

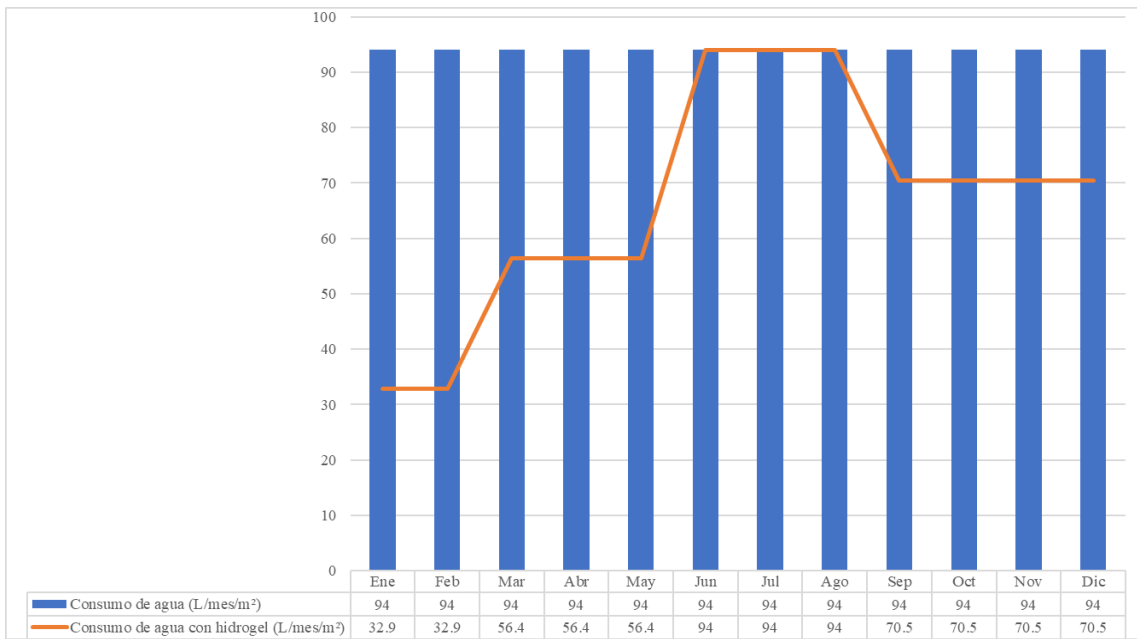
Cabe resaltar que los beneficios mencionados en la Tabla 4.16 son una proyección ideal que no considera el desgaste del suelo. Para aproximarse a esta resulta importante cuidar la calidad del sustrato, para lo cual se recomienda hacer una rotación de cultivos. Esta técnica es recomendada por PROFECO (2021), quien sugiere alternar cada año distintos cultivos en el mismo suelo.

Con base en lo anterior, en este trabajo se recomienda utilizar las mismas especies a lo largo del año, pero cambiando su ubicación dentro del sistema de techo verde. Dado que cada cultivo tiene un periodo distinto de siembra, habrá temporadas en que estén descansando secciones del suelo, mientras termina el ciclo de producción.

La selección de hidrogel para la retención de humedad genera un ahorro anual del 29.2% en el consumo de agua para riego del techo verde, según la experimentación realizada por temporadas. En algunos meses, el riego se cubre en un 35% con agua de la red pública, mientras que, en los meses de mayor temperatura, la lluvia cubre el 100% de la demanda hídrica de las hortalizas. El gráfico de la Figura 4.32 muestra el promedio de gasto hídrico por metro cuadrado de los cultivos seleccionados.

Figura 4.32

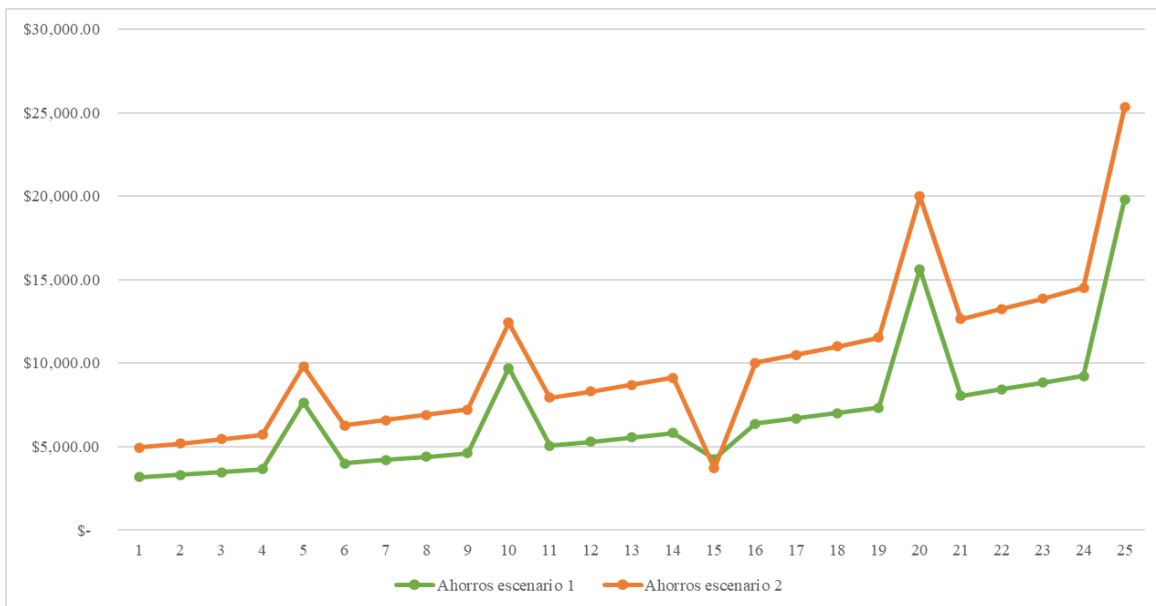
Gráfico de ahorros mensual del consumo de agua sin y con hidrogel.



Retorno de inversión

Figura 4.33

Gráfico de ahorros anuales de cada escenario



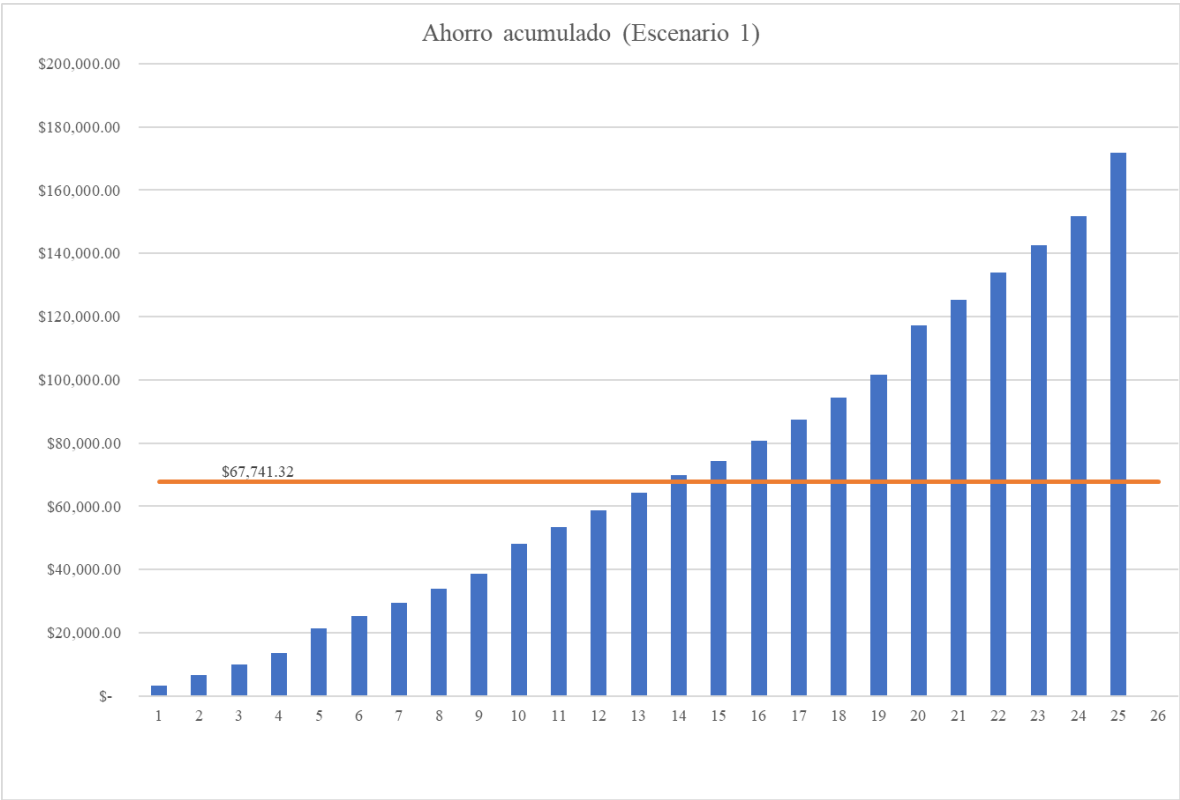
La Figura 4.33 presenta un gráfico que ilustra los ahorros netos de cada escenario a lo largo de 20 años, es decir, los ahorros y beneficios menos los gastos futuros.

En el escenario 1, los beneficios incluyen la reducción del impuesto predial, un ahorro del 25% en climatización (basado en la teoría) y el ahorro por no tener que impermeabilizar la azotea cada 5 años.

En el escenario 2, los beneficios abarcan el ahorro o ingreso por venta de las hortalizas producidas, una disminución del 40% en el gasto energético por climatización, además del ahorro en el impuesto predial y la impermeabilización cada 5 años.

Figura 4.34

Gráfico de retorno de inversión escenario 1

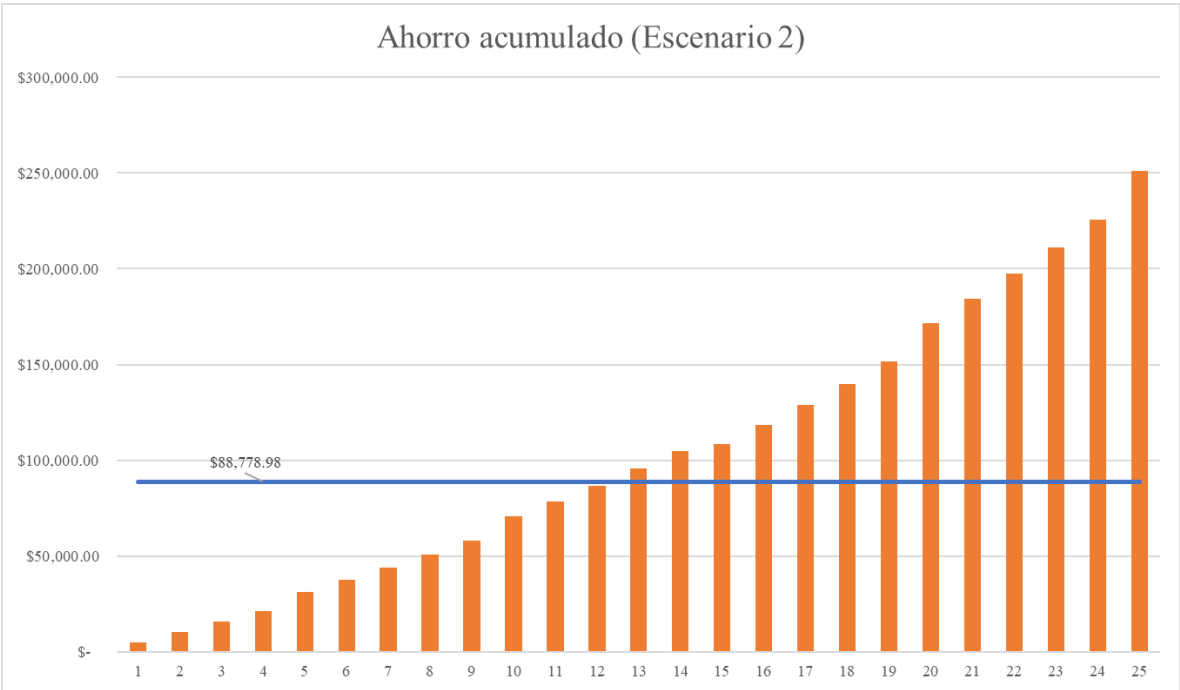


El escenario 1, con plantas de bajo consumo hídrico, es mostrado en la Figura 4.34. Este tiene un retorno de inversión de 13.8 años y una tasa de rendimiento anual del 6.87%. Se espera que el ahorro sea aún mayor debido al aumento de los costos por inflación.

El escenario 2, que incluye un huerto en la azotea, es mostrado en la Figura 4.35, y tiene un retorno de inversión más rápido, de 12.2 años, y una tasa de rendimiento anual del 7.93%. Esto se debe a los mayores ahorros generados por la producción de alimentos.

Figura 4.35

Gráfico de retorno de inversión escenario 2



Asimismo, es importante resaltar que la implementación de un techo verde puede incrementar el valor de una vivienda entre un 6% y un 15% (Zielinski et al., 2012), lo que representa un beneficio económico tangible en caso de venta o renta.

Finalmente, cabe mencionar que los techos verdes ofrecen valores agregados en términos sociales y de salud, que también tienen repercusiones económicas. Sin embargo, estos aspectos no se incluyen en este análisis financiero en virtud de que rebasaban los alcances de este estudio.

4.4.2 Validación de servicios ecosistémicos

El diseño de la solución propuesta busca maximizar la provisión de servicios ecosistémicos. A continuación, se enumeran los servicios proporcionados por el sistema modular de techo verde seleccionado. Es importante destacar que, debido a limitaciones de tiempo, no se ha realizado una cuantificación exhaustiva de cada servicio. Sin embargo, se mencionan todos aquellos presentes en la propuesta, ya sea por la funcionalidad inherente del sistema o por las propiedades de los materiales seleccionados.

Servicios de aprovisionamiento

El sistema contribuye al servicio de alimentos al incorporar cultivos de hortalizas para autoconsumo o venta. Asimismo, promueve el servicio de agua potable al optimizar el uso de este recurso mediante la utilización de hidrogel, que reduce el consumo de agua, y un sistema de riego por goteo.

Servicios de regulación

La selección de vegetación y el aumento de la cubierta vegetal en la azotea contribuyen a la regulación de la calidad del aire, ya que las plantas filtran partículas contaminantes y absorben dióxido de carbono (CO₂). Asimismo, la implementación de techos verdes ayuda a la regulación del clima al disminuir el efecto isla de calor y mejora la sensación térmica en el entorno urbano.

La regulación de la erosión es otro servicio ecosistémico que se ve beneficiado. La presencia de vegetación en la azotea reduce la escorrentía de agua de lluvia, lo que previene la erosión y contribuye a la protección contra riesgos en Tijuana, dada su topografía. Este mismo mecanismo favorece la purificación del agua, ya que el agua de lluvia es retenida en el techo y no se mezcla directamente con el agua del drenaje.

La selección de vegetación prioriza especies que fomentan la polinización, especialmente de polinizadores nativos, al incluir plantas con flores. Además, se investigaron plantas que actúan como barrera natural para el control de plagas en la azotea verde.

Servicios de sostenimiento

Las plantas seleccionadas para la cubierta vegetada realizan la fotosíntesis, un servicio de soporte esencial para el ecosistema. Al crear este espacio verde, se promueve este proceso natural. Asimismo, el servicio de soporte del ciclo de nutrientes se respeta, ya que se promueve el uso de prácticas agroecológicas en las que se aprovecha todo, lo que fomenta la sostenibilidad del sistema.

Servicios culturales

En cuanto a los servicios culturales, el techo verde ofrece un valor estético además de funcional, al generar una apreciación visual de la naturalización de la vivienda y contribuir al reverdecimiento de la ciudad. También puede tener un valor espiritual, al ser un espacio de conexión con uno mismo y con la naturaleza. El diseño de fácil acceso de esta solución busca que el techo verde sea una extensión del área verde de la vivienda, promoviendo la interacción de los habitantes con la naturaleza.

Finalmente, se ha demostrado que el contacto con la naturaleza mejora la salud física y mental, promueve la relajación, mejora la calidad del aire y fomenta la actividad física al interactuar o mantener la superficie vegetada.

4.4.3 Validación de eficiencia energética

Se realizó una simulación mediante el software Design Builder para validar la hipótesis de que la implementación de una azotea verde reduce significativamente las ganancias de calor en una edificación residencial. El análisis se efectuó en una vivienda tipo de dos niveles ubicada en Tijuana, con un área de azotea de 48 metros cuadrados. La edificación se modeló utilizando los materiales típicos de la construcción local: una cubierta convencional compuesta por cuatro capas (asfalto, mortero, concreto colado y panel de yeso) con sus respectivas propiedades térmicas.

El estudio consistió en una comparativa directa entre dos escenarios: la cubierta convencional descrita anteriormente y la misma cubierta a la cual se le incorporó un techo verde de 40

metros cuadrados con un espesor de 12 cm. Es importante destacar que esta fue la única variable modificada entre ambos análisis, manteniendo constantes todas las demás características de la edificación, incluyendo muros y aberturas. La cubierta convencional presentó una transmitancia térmica (valor U) de $2.526 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, indicativa de una transferencia de calor considerable. Los resultados de la simulación, representados en las Figuras 4.39 y 4.40, demuestran que el balance térmico de la cubierta convencional presenta picos de ganancia térmica aproximadamente tres veces mayores que los observados en la cubierta vegetada (4.0 kW vs 1.2 kW respectivamente).

Además de la reducción en la magnitud de las ganancias térmicas, la implementación de la azotea verde demostró una significativa mejora en la estabilidad térmica del sistema, evidenciada por fluctuaciones más suaves en el ciclo diario de temperatura y un comportamiento térmico más equilibrado.

Figura 4.36

Modelado de vivienda con azotea convencional y azotea con módulos de techo verde

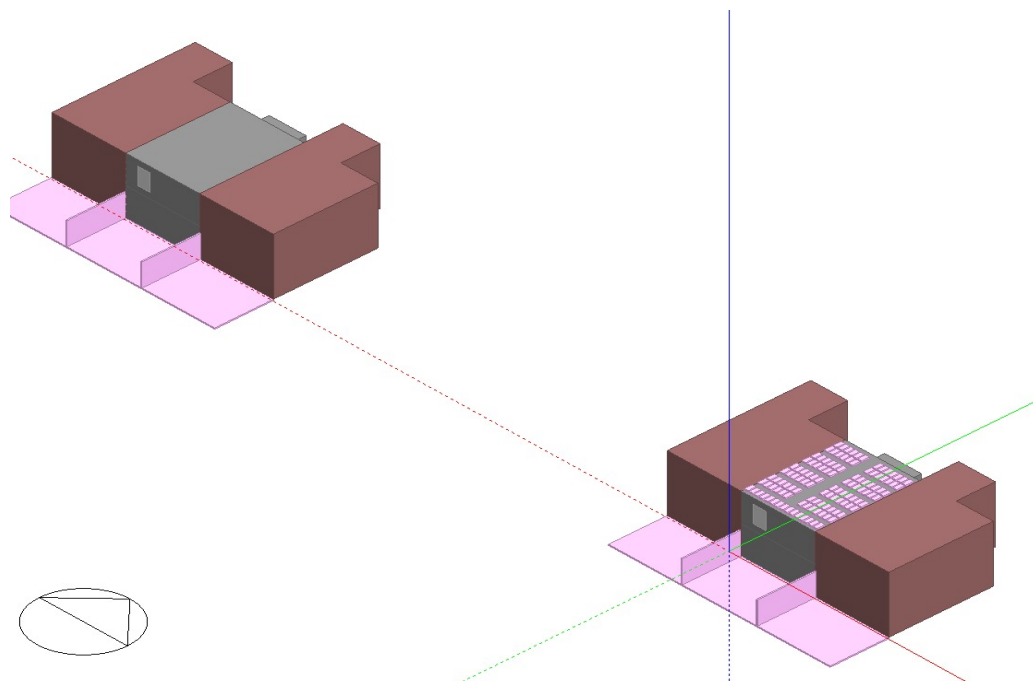


Figura 4.37

Características de la cubierta convencional

Editar cerramientos - Cubierta plana del proyecto

Cerramientos	
Capas	Propiedades superficiales
General	
Nombre	Cubierta plana del proyecto
Fuente	
Categoría	Cubiertas
Región	MEXICO
Color	
Definición	
Método de definición	1-Capas
Parámetros de cálculo	
Capas	
Número de capas	4
Capa más externa	
Material	Asphalt 1
Espesor (m)	0.0100
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	
Capa 2	
Material	Mortar
Espesor (m)	0.05000
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	
Capa 3	
Material	Cast Concrete
Espesor (m)	.15
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	
Capa más interna	
Material	Plasterboard
Espesor (m)	0.0130
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	

Figura 4.38

Valores térmicos de la cubierta convencional

Editar cerramientos - Cubierta plana del proyecto

Cerramientos	
Capas	Propiedades superficiales
Superficie interior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	4.460
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5.540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0.100
Superficie exterior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	19.870
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5.130
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0.040
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	3.909
Valor R (m ² -K/W)	0.396
Valor U (W/m²-K)	2.526
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0.2230
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m ² -K)	206.6144
Límite superior de resistencia (m ² -K/W)	0.396
Límite inferior de resistencia (m ² -K/W)	0.396
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	3.909
Valor R (m ² -K/W)	0.396
Valor U (W/m²-K)	2.526

Figura 4.39

Balance térmico de la cubierta convencional

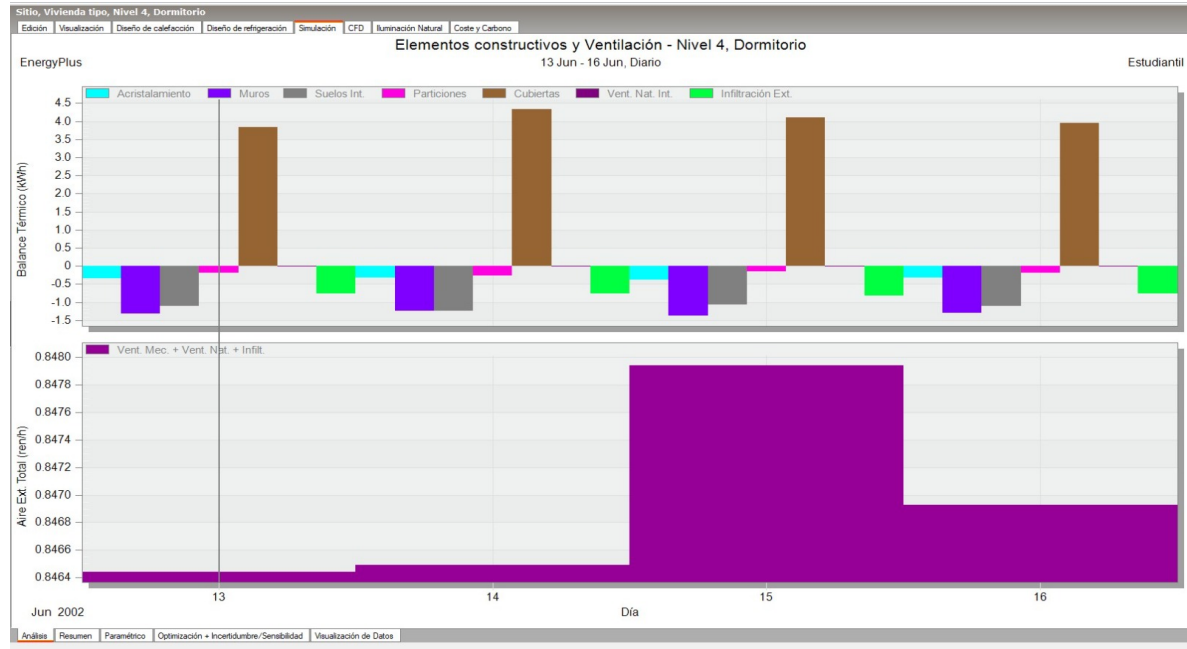
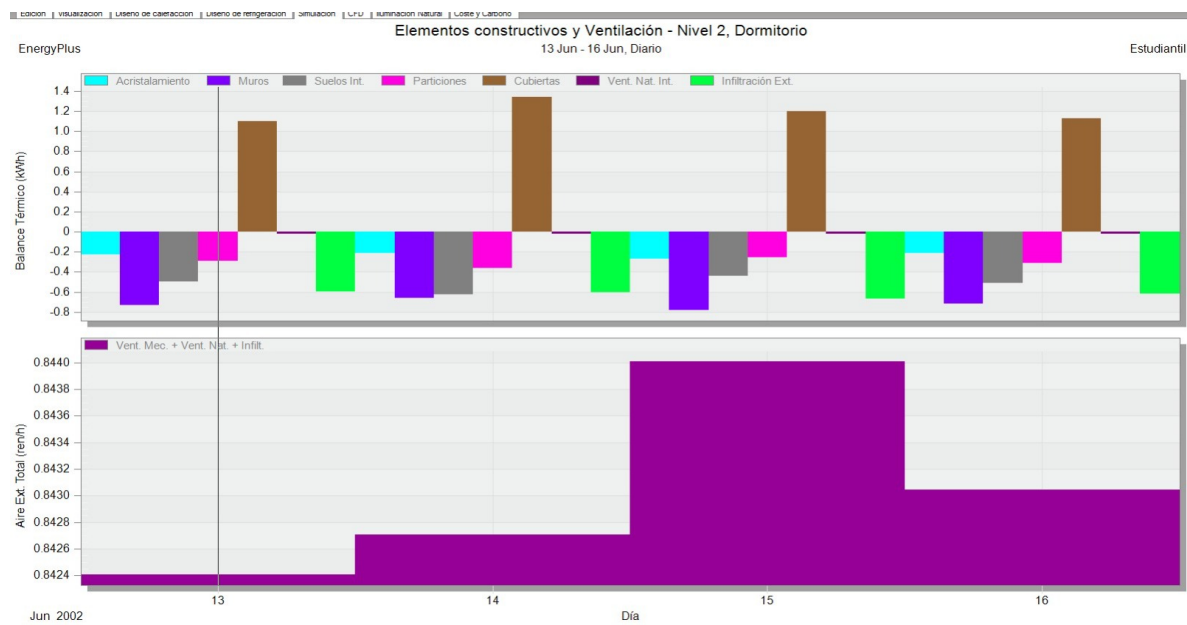


Figura 4.40

Balance térmico de la cubierta con módulos de azotea verde



5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El objetivo general de este trabajo fue desarrollar una propuesta constructiva y funcional de un sistema de techo verde asequible para viviendas en Tijuana que mejorara la eficiencia energética y aportará servicios ecosistémicos. Los resultados demuestran que se ha logrado el objetivo de diseñar un sistema modular que utiliza una combinación de sustrato ligero (GROW e hidrogel) y vegetación adaptada al clima local, capaz de reducir el consumo de agua y de energía en las viviendas.

El sistema propuesto, al ser modular, permite una implementación gradual y adaptable a diferentes tipos de vivienda, lo que lo hace más accesible para los habitantes de Tijuana. La modularidad ofrece flexibilidad en el diseño y la instalación, permitiendo a los propietarios adaptar el techo verde a sus necesidades y presupuesto, además de facilitar su traslado en caso de mudanza. Considerando los requerimientos normativos de carga viva máxima de 100 kg/m², la experimentación demostró que un sistema con plantas nativas, combinado con andadores de tezontle, permite mantener el peso por debajo de este umbral crítico, optimizando el uso de la superficie del techo.

En cuanto a los objetivos específicos, se cumplió con la realización de una revisión exhaustiva del estado del arte sobre techos verdes, que permitió identificar los sistemas existentes, sus características y costos.

La investigación estableció el listado definitivo de especies para techos verdes en Tijuana, dividido en dos categorías funcionales:

1. Especies ornamentales seleccionadas:
 - a. Artemisia californica: arbusto nativo con requerimiento mínimo de 23 cm de precipitación anual
 - b. Oenothera californica: hierba perenne nativa que requiere solo 18 cm de precipitación anual
 - c. Gambelia speciosa: arbusto adaptado que necesita 30 cm de precipitación anual

- d. *Mirabilis laevis*: hierba perenne nativa con requerimiento de 18 cm de precipitación anual
- 2. Especies productivas seleccionadas:
 - a. Cultivos principales:
 - i. Guisante
 - ii. Judía
 - iii. Haba
 - iv. Cebolla
 - v. Berenjena
 - b. Plantas de control biológico:
 - i. Salvia
 - ii. Lavanda

Esta selección representa la culminación del análisis de adaptabilidad al clima local, requerimientos hídricos y capacidad de provisión de servicios ecosistémicos. Las especies ornamentales destacan por su bajo consumo hídrico (18-30 cm de precipitación anual) y adaptabilidad a sustratos delgados, mientras que los cultivos seleccionados optimizan la producción de alimentos (12.5 kg/m²/año en total) manteniendo demandas hídricas moderadas. El conjunto completo de especies maximiza los beneficios ambientales incluyendo regulación térmica, retención de agua, polinización y producción de alimentos, mientras se adapta a las condiciones específicas de Tijuana.

Lo anterior respondió a la pregunta de investigación sobre qué vegetación es idónea para techos verdes en Tijuana, a través de ofrecer una selección basada en criterios de bajo consumo hídrico, adaptabilidad al clima y aporte de servicios ecosistémicos. La elección de estas especies no solo garantiza la supervivencia y el crecimiento óptimo de la vegetación en las condiciones climáticas de Tijuana, sino que también maximiza los beneficios ecosistémicos que el techo verde puede proporcionar, tales como la atracción de polinizadores, el control de plagas y la mejora de la calidad del aire.

Se realizó una simulación energética en Design Builder comparando el desempeño térmico de una cubierta convencional contra una cubierta vegetada, donde los resultados demostraron

una reducción del 70% en las ganancias de calor con la implementación de la azotea verde, pasando de picos máximos de 4.0 kW a 1.2 kW.

La simulación también evidenció una notable estabilización en el comportamiento térmico diario de la edificación, con fluctuaciones de temperatura significativamente más suaves en la cubierta vegetada. Estos resultados cuantitativos validan contundentemente el supuesto del trabajo sobre la capacidad de los techos verdes para mejorar la eficiencia energética de las viviendas al actuar como aislante térmico, lo que se traduce en una reducción sustancial en el consumo energético para climatización. Al disminuir la demanda energética en esta proporción, los techos verdes no solo representan un ahorro significativo en los costos de electricidad para los propietarios, sino que también contribuyen de manera mensurable a reducir la huella de carbono de las viviendas y a mitigar el cambio climático.

El análisis costo-beneficio evaluó dos escenarios: un techo verde extensivo con plantas nativas ornamentales (Escenario 1) cuyo costo de implementación fue de \$52,269.32 y un techo verde intensivo con huerto (Escenario 2) con una inversión requerida de \$64,756.98. Ambos precios se dan en pesos mexicanos y se estimaron para una superficie de 48 metros cuadrados. El estudio demostró la viabilidad económica de ambas propuestas, con un retorno de inversión de 13.8 años para el escenario 1 y 12.2 años para el escenario 2, alcanzando tasas de rendimiento anual de 6.87% y 7.93% respectivamente.

Los resultados del análisis financiero responden a la pregunta de investigación sobre la relación costo-beneficio de implementar vegetación en la azotea, con lo que se demostró que la inversión en un techo verde es económicamente viable y atractiva, especialmente en el escenario 2, que incluye la producción de alimentos. El escenario 2, además de los beneficios económicos del ahorro energético, ofrece la posibilidad de generar ingresos adicionales a través de la venta de productos cultivados en el techo verde, lo que lo convierte en una opción aún más atractiva para los propietarios.

Aunque no se realizó un análisis exhaustivo del impacto social, los cuestionarios aplicados en las colonias El Lago y Santa Fe revelaron un alto interés en la implementación de techos verdes. La disposición a invertir alcanzó el 100% en El Lago y 87.5% en Santa Fe, con residentes dispuestos a realizar inversiones mensuales entre 200 y 3000 pesos. Los promedios

de inversión mensual fueron de 500 pesos en El Lago y 780 pesos en Santa Fe, diferencia que sugiere la necesidad de desarrollar estrategias de financiamiento flexibles y escalonadas.

Notablemente, el 83.3% de los encuestados en El Lago reportó tener experiencia con el cuidado de vegetación en sus viviendas, lo que representa una base sólida para la adopción de techos verdes. Sin embargo, se identificaron barreras importantes como la inversión inicial, limitaciones de tiempo (23.1% en El Lago) y disponibilidad de azotea (12.5% en Santa Fe). Esto refuerza la importancia del sistema modular propuesto, que permite una implementación gradual y adaptable a diferentes contextos y capacidades económicas.

La información de las encuestas fue fundamental para adaptar la propuesta a las necesidades y expectativas de la comunidad. La incorporación de estas preferencias en el diseño puede aumentar la satisfacción de los usuarios, fomentar un mayor uso y apropiación del espacio, y generar un impacto social positivo en la comunidad. Estos hallazgos son cruciales para el diseño de políticas y programas de incentivos que faciliten la adopción de techos verdes en Tijuana, aunque se requiere una comprensión más profunda de la percepción de los usuarios sobre los costos y la viabilidad de estas soluciones.

Los resultados de la experimentación con sustratos demostraron que la combinación de GROW e hidrogel ofrece un equilibrio óptimo entre retención de humedad, peso y aporte de nutrientes. Esta mezcla mostró una notable capacidad de retención de agua, manteniendo niveles de humedad superiores al 50% durante más de 7 días, en comparación con otras combinaciones probadas. Con un peso de 63.17 kg/m² para un espesor de 12 cm en estado saturado, esta solución cumple con los requerimientos estructurales mientras maximiza el rendimiento. La alternativa de GROW con paja, aunque más ligera (56.74 kg/m²), mostró una retención de humedad ligeramente menor pero igualmente satisfactoria para el clima de Tijuana.

Un hallazgo significativo fue que la combinación de hidrogel y paja con tierra presentó un rendimiento inferior al esperado - mientras que individualmente tanto la paja como el hidrogel mantenían niveles de humedad superiores a 6.0 hasta el día 5, su combinación cayó por debajo de este nivel desde el día 4. Este comportamiento inesperado sugiere que las

propiedades de retención de agua de estos materiales no se suman de manera directa al combinarlos.

Además, la selección de plantas nativas y adaptadas, junto con el uso de riego por goteo, contribuyen a un ahorro significativo de agua, un recurso crítico en la región. Estos hallazgos son relevantes para responder a la pregunta de investigación sobre las especificaciones constructivas y los requisitos funcionales de un techo verde asequible en Tijuana, ya que demuestran que es posible diseñar un sistema que sea eficiente en el uso de recursos y adaptado a las condiciones locales.

En conclusión, este trabajo demuestra que los techos verdes son una estrategia viable y efectiva para mejorar la sustentabilidad de las viviendas en Tijuana. Al abordar los desafíos específicos del clima y la disponibilidad de recursos, la propuesta ofrece una solución práctica y asequible para aumentar las superficies vegetadas, reducir el consumo de agua y energía, y mejorar la calidad de vida de los habitantes.

La implementación de techos verdes en Tijuana no solo tiene beneficios ambientales y económicos, sino que también contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y promueve un entorno urbano más resiliente y habitable. La flexibilidad del sistema modular, la elección de vegetación adecuada y el uso de sustratos eficientes en retención de agua hacen de esta propuesta una solución adaptable y escalable, con el potencial de generar un impacto significativo en la ciudad.

5.2 Recomendaciones y propuestas de investigaciones futuras

De acuerdo con los hallazgos de este trabajo, se presentan las siguientes recomendaciones y propuestas de investigación futura:

Como primera recomendación, desde el punto de vista práctico, se propone la elaboración de un manual detallado que contenga especificaciones técnicas, selección de especies adecuadas para la región, consideraciones de diseño estructural, instrucciones paso a paso para la instalación, y recomendaciones de mantenimiento para la implementación de superficies

vegetadas en viviendas. Este manual sería particularmente útil para incorporar esta tecnología en viviendas de interés social, permitiendo así un alcance más amplio de los beneficios ecológicos y de eficiencia energética. Además, este manual podría servir como una herramienta educativa para fomentar la conciencia sobre los beneficios de los techos verdes y empoderar a los propietarios de viviendas para que implementen esta solución de manera autónoma.

En cuanto a las propuestas de investigación futura, se propone establecer colaboraciones con instituciones académicas y organizaciones no gubernamentales para llevar a cabo investigaciones adicionales sobre los techos verdes en Tijuana. Estas investigaciones podrían enfocarse en temas como la evaluación a largo plazo del rendimiento de los techos verdes en diferentes condiciones climáticas, el desarrollo de nuevas tecnologías y materiales para mejorar la eficiencia y la asequibilidad de los sistemas, y la evaluación del impacto social y psicológico de los techos verdes en la salud y el bienestar de los residentes.

Entre los principales obstáculos identificados destaca el costo inicial de la inversión. Por ello, se recomienda explorar diferentes métodos de financiamiento para hacer esta inversión más accesible. Como primera alternativa, se podría evaluar la opción de utilizar los Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA) como un vehículo financiero para impulsar la adopción de techos verdes destinados a la agricultura urbana, ya que estos ofrecen programas de financiamiento y asistencia técnica a proyectos que promueven prácticas agrícolas sostenibles y la producción de alimentos en entornos urbanos.

Una segunda recomendación en materia de financiamiento es crear un programa de subsidio a nivel municipal que se enfoque en la implementación de sistemas modulares de techos verdes en viviendas de interés social y en zonas con mayor necesidad de vegetación. Este programa podría ser financiado a través de impuestos municipales, fondos federales o estatales, e incluso mediante alianzas público-privadas.

Como tercera alternativa financiera, se recomienda considerar la inclusión de esta ecotecnología dentro de los programas de Hipoteca Verde del INFONAVIT, dado que representa una mejora significativa en la calidad de la vivienda y se alinea con los objetivos de esta institución de promover viviendas más sostenibles y eficientes. Para lograr esto, sería necesario trabajar en colaboración con INFONAVIT para desarrollar criterios de evaluación

y requisitos técnicos específicos para la inclusión de techos verdes en sus programas de financiamiento.

Como línea adicional de investigación futura, se recomienda llevar a cabo un estudio para investigar la viabilidad y los beneficios de implementar muros verdes en viviendas plurifamiliares en Tijuana. Este enfoque permitiría evaluar los posibles beneficios que dicha implementación podría aportar al bienestar de sus habitantes y al crecimiento vertical de la ciudad. Este estudio debería considerar factores como la orientación de los muros, la selección de especies adecuadas para condiciones de sombra y luz, los sistemas de riego y drenaje, y los costos de instalación y mantenimiento. Además, sería importante evaluar el impacto de los muros verdes en la eficiencia energética de los edificios y su contribución a la reducción del efecto isla de calor en zonas densamente pobladas.

Estas recomendaciones y propuestas de investigación futura buscan superar las barreras financieras y técnicas para una adopción más amplia de ecotecnologías como los techos y muros verdes, contribuyendo así a un entorno más sustentable en Tijuana. Al abordar estos desafíos de manera integral, se puede lograr un cambio significativo en la forma en que se diseñan y construyen las viviendas en la ciudad, promoviendo un futuro más verde y resiliente.

Referencias

- AgroHuerto. (2022). *Todo sobre huertos. Guía completa sobre como cultivar*. Recuperado de: <https://www.agrohuerto.com/>
- Agromatica. (2022). *Agromática -La web de referencia en agricultura*. Recuperado de: <https://www.agromatica.es/>
- Agroptima Blog. (s.f.). *Blog*. Recuperado el 17 de agosto de 2022 de <https://blog.agroptima.com/es/blog/>.
- Andrade, R. (2014). *Análisis de la factibilidad del uso de plantas nativas en los parques urbanos de la ciudad de Ensenada, B.C.* Recuperado de: <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/handle/20.500.12930/260>
- Azeñas, V. (2017). *Evaluation of Mediterranean plant species for extensive vegetated roof and environmental performance* [Universitat de les Illes Balears, 2017.]. Recuperado de: <https://www.tdx.cat/handle/10803/462997#page=4>
- Balvanera et al. (2017). Capítulo 3. Ecosystem services. *The Geo handbook and on biodiversity observation networks*. pp. 39-78. Recuperado de: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-27288-7>
- Bellini, A. (2018, agosto). *La azotea verde más grande de Latinoamérica está en la Ciudad de México*. MxCity. Recuperado de: <https://mxcity.mx/2018/08/la-azotea-verde-mas-grande-de-latinoamerica/>
- Bki & greean gardens group. (2012). *The Drought Tolerant Garden. Los Angeles County Handbook*. Recuperado de: <https://planning.lacounty.gov/site/sea/wp-content/uploads/2019/04/Drought-Tolerant-Garden-Handbook.pdf>
- Calflora. (2022). *Information on wild California plants*. Recuperado de: <https://www.calflora.org/entry/palette.html#y=32.58409&x=-117.04015&z=10&lpcli=t&water=L>

- California Native Plant Society (2022) *Native Planting Guides*. Recuperado de: <https://www.cnps.org/gardening/choosing-your-plants/native-planting-guides>
- CESPT (2022) *Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana*. Recuperado de: <https://www.cespt.gob.mx/>
- Chávez, A., Del Campo, F. & Bojórquez, G. (2020) *Modelo de jardín vertical con vegetación endémica para espacios públicos exteriores en El Grillo, Jalisco*. Recuperado de: <https://www.aulavirtualusmp.pe/ojs/index.php/rc/article/view/2069/2215>
- Cortes, K. (2019) *Análisis del comportamiento térmico, beneficios y costos, de dos tipos de techos verdes en sistema modular, en Poza Rica, Veracruz*. Recuperado de: https://www.uv.mx/pozarica/mca/files/2019/05/G06_KAREN-AURORA-CORTES-SOSA.pdf
- Cristobal, J. J. (2019). *Techos verdes y sus beneficios*. (Publicación No. 0102) [Trabajo de grado, Universidad Científica del Sur]. Recuperado de: <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1477/TB-Cristobal%20J.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Domínguez, A. (2016) *Estimaciones de captura de los parques y emisiones de CO2 vehicular en Tijuana, B.C.* Disponible en: <https://colef.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1014/198>
- Environmental Protection Agency (2016) *Greenacres: Landscaping with Native Plants*. Recuperado de: <https://archive.epa.gov/greenacres/web/html/index.html>
- FIRA (2020) *Acciones FIRA con el Ambiente*. Recuperado de: <https://www.fira.gob.mx/Nd/ESG-ambiental.jsp#prosostenible>
- Flores, E. y López, L. (2019). *Análisis multiparamétrico de una vivienda ecológica con indicadores de sustentabilidad y eficiencia energética*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Bernardo-Lopez-Sosa/publication/341296893_Analisis_multiparametrico_de_una_vivienda_ecologica_con_indicadores_de_sustentabilidad_y_eficiencia_energetica/links/5eb98acb4585152169c81d9

4/Análisis-multiparamétrico-de-una-vivienda-ecológica-con-indicadores-de-sustentabilidad-y-eficiencia-energética.pdf

Gaceta oficial del Distrito Federal (2007) *Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007* Recuperado de: https://drive.google.com/file/d/0B-NRmSf37XVhcTJYbExvckZPbXM/edit?resourcekey=0-UOoQao-b_fw3hT9McaaJqQ

Green Technology (2022) *17 plantas que nos ayudan a controlar plagas de forma ecológica*. Recuperado de: <https://ecoinventos.com/plantas-controlar-plagas-ecologica/>

Guerrero Pérez, R. (2013). *Edificación y eficiencia energética en los edificios*: (UF0569). IC Editorial. Recuperado de: <https://elibro-net.ezproxy.iteso.mx/es/ereader/iteso/43901>

Gutiérrez, J., Aguilera, L., & González, C. (2008). *Agroecología y sustentabilidad*. *Convergencia*, 15(46), 51-87. Recuperado en 22 de noviembre de 2022, de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-14352008000100004&lng=es&tlng=es.

Herbotecnia. (s.f.). *Tecnologías de cultivo y poscosecha de plantas medicinales, aromáticas y tintóreas*. Recuperado de: <http://herbotecnia.com.ar/>

Huerto en casa. (2022). *Jardinería para todos. Desde la siembra hasta la cosecha*. Recuperado de: <https://huerto-en-casa.com/>

Huizar, H. (2012). *Evaluación de los parques de Tijuana desde un enfoque de justicia ambiental*. Recuperado de: <https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/2014/03/TESIS-Huizar-Contreras-Heber-1.pdf>

Hydroenvironment (s.f.) *Guía: Perlita como mejorador de tierras*. Recuperado de: https://hydroenvironment.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=90

INFONAVIT (2017) *Hipoteca Verde*. Recuperado de: https://portalmx.infonavit.org.mx/wps/portal/infonavit.web/proveedores-externos/para-tu-gestion/desarrolladores/hipoteca-verde!/ut/p/z1/pZJbC4JAEIV_ja_O5GWx3tawVYkukGT7EhqbGubGavn3E3sKSoPmbYb

vzBwOAxXi4FXyKlKkKWSVIF1_4ORIGKI_tyYrFqKB27W720SGG1q-
DfsBwCSEAP9Dv9n9qDccROZiBzi-g3ThBd50aRosmvyx9F8R__PcCH1--
BD5wwiUdGADIC9Bn2wFBIYzZD4Fkp09dH0Co1nQy4EmehhNLvqhvnTXOrZxpq2Lat
Lk6yLhJdqkzDT5Jc1g3E7yTcrIFXMRbBxS4fS_oEVDPqKQ!!/dz/d5/L2dBISEvZ0FBIS9
nQSEh/

INFONAVIT (2021) *Manual explicativo de Vivienda de la Vivienda Ecológica*. Recuperado de:
[https://www.scribd.com/document/344274899/Manual-Explicativo-de-Vivienda-
Ecologica-pdf](https://www.scribd.com/document/344274899/Manual-Explicativo-de-Vivienda-Ecologica-pdf)

Kasten, K. (2016) *Atributos y criterios de diseño sustentable para el desarrollo de un módulo de azotea verde extensivo / mixto en Zapopan*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11117/3552>

McCombs, H. C. (2015). *LEED Green Associate. Exam Preparation Guide LEED V4 Edition*. American Technical Publishers.

Minke, G. (2010) *Techos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Recuperado de:
https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2016-07-10_08-22-37135470.pdf

Myers, N., Mittermeier, R., Mittermeier, C., da Fonseca, G. & Kent, J. (2000) *Biodiversity hotspots for conservation priorities*. *Nature*, Vol. 403, pp.853-858. Recuperado de:
<https://www.nature.com/articles/35002501>

Ojeda, L. & Huizar, H. (2014) *Una perspectiva de justicia ambiental: Tijuana*. En L. Ojeda, I. Espejel y Colegio de la Frontera Norte (Ed.), *Cuando las áreas verdes se transforman en paisaje urbano. La visión de Baja California* (pp. 87 -121) Recuperado de:
<https://colef.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1014/580>

Ordóñez, G. (2020) *Tijuana ante el confinamiento social impuesto por la COVID 19: habitabilidad de las viviendas, entorno urbano y condiciones económicas de los hogares*. Recuperado de:
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-05652020000200303

Pérez, G. & Coma, J. (2020). *Infraestructura Urbana Verde: Techos Verdes y Sistemas Verdes Verticales que Brindan Múltiples Ecosistemas en el Entorno*. *Anales de Edificación*, 6(2), 28–37. Recuperado de: <https://doi-org.ezproxy.iteso.mx/10.20868/ade.2020.4502>

- Porcar Anento, R. (2019). *Mapeo de los servicios ecosistémicos de una ciudad compacta: El caso de Barcelona*. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/190036#>
- PROFECO (2021) *Asociación y rotación de cultivos*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/profeco/es/articulos/asociacion-y-rotacion-de-cultivos?idiom=es>
- PROFEPA (2023) *Día Internacional de la Eficiencia Energética*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/profepa/es/articulos/dia-internacional-de-la-eficiencia-energetica-324020?idiom=es>
- Reglamento de la Ley de edificaciones del estado de Baja California (s.f.) Recuperado de: <https://www.smie.org.mx/archivos/informacion-tecnica/reglamentos-construccion-mexico/baja-califonia/baja-california-reglamento-construccion-estatal-1976.pdf>
- Reyes, D. (2017) *La educación ambiental como herramienta para la sustentabilidad urbana. Experiencias en Tijuana, Baja California y Salvatierra, Guanajuato*. Recuperado de: <http://repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/4968/3/La%20educaci%c3%b3n%20ambiental%20como%20herramienta%20para%20la%20sustentabilidad%20urbana.%20Experiencias%20en%20Tijuana%2c%20Baja%20California%20y%20Salvatierra%2c%20Guanajuato.pdf>
- Rosales, E. (2019, octubre). *0.44 m² por habitante*. Newsweek México. Recuperado de: <https://newsweekespanol.com/2019/10/0-44-m2-por-habitante/>
- Sahagún, M. (2019). *Análisis del comportamiento térmico de un techo verde desértico y su espesor de sustrato en el clima seco del noroeste de México*. Recuperado de: <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/5883#>
- Scherer, M. J., Alves, T. S., & Redin, J. (2018). *Green envelopes applied in buildings: benefits and techniques; Envoltórias vegetadas aplicadas em edificações: benefícios e técnicas*. Revista de Arquitetura IMED; v. 7, n. 1 (2018): Jan./Jun.; 84-101 ; 2318-1109 ; 10.18256/2318-1109.2018.V7i1.Recuperado de: <https://doi-org.ezproxy.iteso.mx/10.18256/2318-1109.2018.v7i1.2693>

- SEMARNAT (2015) *Trámite SEMARNAT-08-023-A*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/tramite-semarnat-08-023-a>
- Shock, C. & Welch, T (2013) *El riego por goteo: Una introducción. Técnicas para la agricultura sostenible*. Recuperado de: <https://catalog.extension.oregonstate.edu/sites/catalog/files/project/pdf/em8782-s.pdf>
- Singular Green (2022) *Cubiertas vegetales*. Recuperado de: <https://www.singulargreen.com/cubiertas-vegetales/>
- Singular Green (2022) *Sombras vegetales*. Recuperado de: <https://www.singulargreen.com/green-shades-toldos-vegetales/>
- Soto, M., Barbaro, L., Coviella, M. & Stancanelli, S. (s.f.) *Catálogo de plantas para techos verdes*. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_catlogo_de_plantas_para_techos_verdes.pdf
- Vestrella, A. (2016) *Cubiertas ajardinadas en ambiente mediterráneo: aspectos ecofisiológicos y agronómicos*. Recuperado de: <https://www.tesisenred.net/handle/10803/386439#page=40>
- Wheater Spark (2021) *Datos históricos meteorológicos de 2021 en Tijuana*. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/h/y/1819/2021/Datos-hist%C3%B3ricos-meteorol%C3%B3gicos-de-2021-en-Tijuana-M%C3%A9xico>
- Yávar, J. (2014, junio 29). *Arquitectura y Paisaje: las cubiertas verdes del Museo del Acero Horno 3, un ícono de la industrialización en México*. ArchDaily. Recuperado de: <https://www.archdaily.mx/mx/623215/arquitectura-y-paisaje-las-cubiertas-verdes-del-museo-del-acero-horno-3-un-icono-de-la-industrializacion-en-mexico>
- Yeomans, F., Almada, D. & Martínez, R. (2013) *Evaluación de los Efectos de Techo Verde en el Nivel de Confort Térmico en Vivienda de Interés Social*. Recuperado de: <http://www.laccei.org/LACCEI2013-Cancun/RefereedPapers/RP298.pdf>
- Zielinski, S., García Collante, M. A., & Vega Paternina, J. C. (2012). *Techos verdes: ¿Una herramienta viable para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa*

Marta? *Gestión y Ambiente*, 15(1), 91-104. Recuperado de:
<https://www.redalyc.org/pdf/1694/169424101008.pdf>

Anexos

Anexo 1 – Formulario de cuestionario

Enlace a la encuesta: <https://forms.gle/kdZvmHJFMX5y2XgT9>

Datos generales

1. Número de ocupantes del hogar
2. Rango de edad (de entrevistado/a)
 - a. Menor de 18 años
 - b. 18 a 29 años
 - c. 30 a 39 años
 - d. 40 a 49 años
 - e. 50 a 59 años
 - f. Mayo de 60 años

Datos de la vivienda

1. Su vivienda es casa o apartamento
2. Indique las características que mejor describan su vivienda: Número de habitaciones, baños, niveles
3. Marque si la casa cuenta con: patio frontal, patio trasero y pasillo lateral.
4. ¿De qué material es su techo?
 - a. Teja
 - b. Concreto
 - c. Madera
 - d. Lámina
 - e. Otro
5. ¿Su vivienda es...?
 - a. Propia
 - b. Hipotecada
 - c. Prestada
 - d. Rentada
6. ¿Cuál de las siguientes opciones refleja mejor la vegetación en su vivienda?
 - a. Plantas aromáticas

- b. Pasto
 - c. Plantas de interior
 - d. Suculentas
 - e. Flores
 - f. Árboles
 - g. Arbustos
 - h. No tengo plantas
7. ¿Cuántos metros cuadrados aproximadamente tiene en su casa destinados a la vegetación?

Confort térmico y datos energéticos

8. ¿Cuánto es su consumo de energía bimestral promedio? (Indique con números enteros de acuerdo con su recibo de CFE)
9. ¿Cuál de los siguientes equipos de electrodomésticos tiene en su hogar? (Seleccione todos los que apliquen)
- a. Televisión
 - b. Refrigerador
 - c. Lavadora
 - d. Secadora
 - e. Microondas
 - f. Estufa
 - g. Licuadora
 - h. Tostadora
 - i. Computadora
 - j. Aire acondicionado
 - k. Otro
10. En promedio ¿Cuánto tiempo (en minutos) utiliza la iluminación artificial al día?
11. ¿Considera que su casa es fría?
- a. Siempre
 - b. Algunas veces
 - c. Rara vez
 - d. Nunca

12. ¿Considera que su casa es caliente?
 - a. Siempre
 - b. Algunas veces
 - c. Rara vez
 - d. Nunca
13. ¿Cuál es el mes que percibe más cálido?
14. ¿Cuál es el mes que percibe más frío?
15. ¿Cómo mantiene una temperatura ideal para estar cómodo/a en su hogar? (Seleccione todas las que apliquen)
 - a. Sistema de calefacción
 - b. Sistema de aire acondicionado
 - c. Ropa de abrigadora
 - d. Ropa refrescante
 - e. Ventiladores
 - f. Ventilación natural
 - g. Ninguna de la anteriores
 - h. Otro

Hábitos, opinión e interés

1. ¿Cuenta tu colonia con áreas verdes comunes, (parques, alamedas, jardines etc)?
2. ¿Con qué frecuencia hace uso de las áreas comunes de la colonia?
 - a. Una vez a la semana
 - b. Dos a tres veces por semana
 - c. Cuatro a seis veces por semana
 - d. Todos los días
3. ¿Qué opina de las áreas verdes que hay en la colonia?
 - a. Son suficientes
 - b. Hacen falta más
 - c. Se podría usar el espacio para algo más
4. En una escala de 1 a 10 ¿Cómo calificaría la calidad de las áreas verdes de la colonia?
5. Indique con qué frecuencia realiza las siguientes actividades relacionadas con el medio ambiente o la naturaleza (Nunca, Rara vez, Algunas veces o Siempre)

- a. Jardinería
 - b. Senderismo
 - c. Cursos de temas ambientales
 - d. Reciclaje
 - e. Limpieza de espacios públicos
 - f. Acampar
 - g. Cultivar alimentos en casa
6. ¿Estaría dispuesto/a en invertir en una casa con un enfoque ecológico o ecotecnologías?
7. ¿Cuánto dinero estaría dispuesta/o a invertir mensualmente en una superficie vegetada?
8. Si en su azotea hubiera áreas verdes ¿Para qué actividades la utilizaría? (Seleccione todas las que apliquen)
- a. Recreación
 - b. Relajación
 - c. Hacer eventos
 - d. Cultivar alimentos
 - e. Interacción la naturaleza
 - f. Otro
9. ¿Cuál sería un limitante o barrera por la que no implementaría un proyecto de azotea verde?
- a. La inversión
 - b. No tengo tiempo
 - c. No tengo interés
 - d. Utilizo mi azotea con otros fines
 - e. Otro
10. ¿Cuánto tiempo tendría disponible dedicar para el mantenimiento de una superficie vegetada en el techo (riego, revisión estructural, cuidado de plagas, poda, etc.)? (Escriba el tiempo en horas por semana)
11. ¿Qué tipo de vegetación quisieras tener en un techo verde?
- a. Plantas nativas y de la región

- b. Plantas desérticas
- c. Hortalizas
- d. Plantas con flores
- e. Otro

Anexo 2 – Formulario de observación directa

Tabla para diversidad de plantas

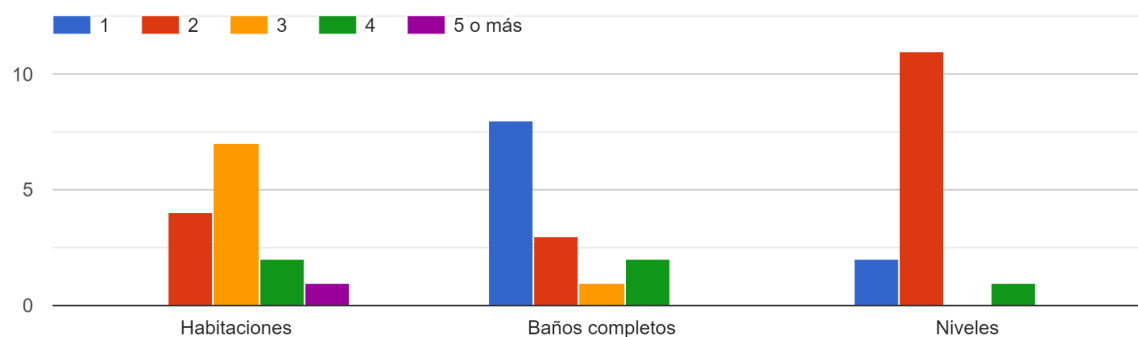
Especie (nombre)	Estado actual				Nativa		Superficie vegetada		Temperatura	Zona
	MB	B	M	MM	Sí	No	Sí	No		
	MB	B	M	MM	Sí	No	Sí	No		
	MB	B	M	MM	Sí	No	Sí	No		
	MB	B	M	MM	Sí	No	Sí	No		
	MB	B	M	MM	Sí	No	Sí	No		
	MB	B	M	MM	Sí	No	Sí	No		
	MB	B	M	MM	Sí	No	Sí	No		
	MB	B	M	MM	Sí	No	Sí	No		

MB: Muy bueno (Protegida, fuerte, cantidad abundante) B: Bueno (Fuerte en cantidad moderada) M: Malo (Poca cantidad con hojas o ramas rotas/débiles) MM: Muy malo (Aislada, seca y frágil)

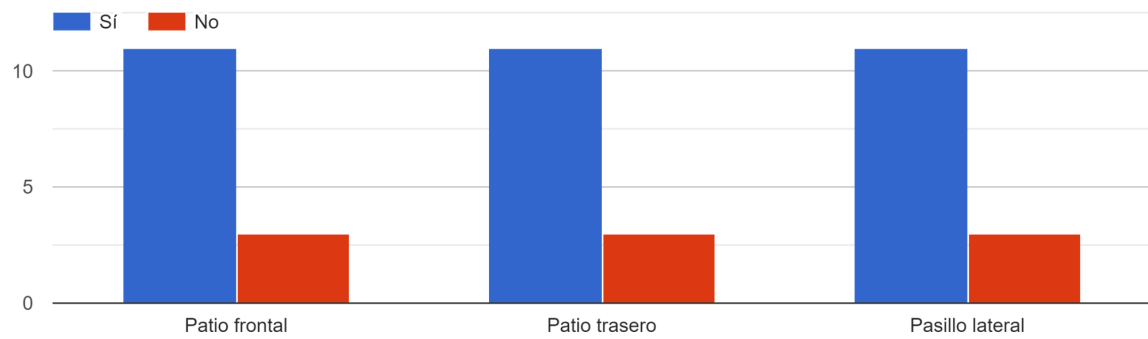
Anexo 3 - Gráficos del cuestionario

Gráficas cuestionario de El Lago

Indique las características que mejor describan su vivienda

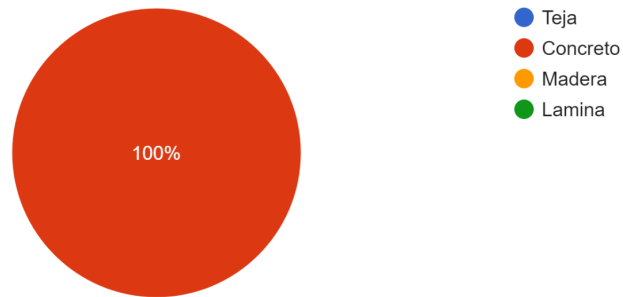


Su casa cuenta con:



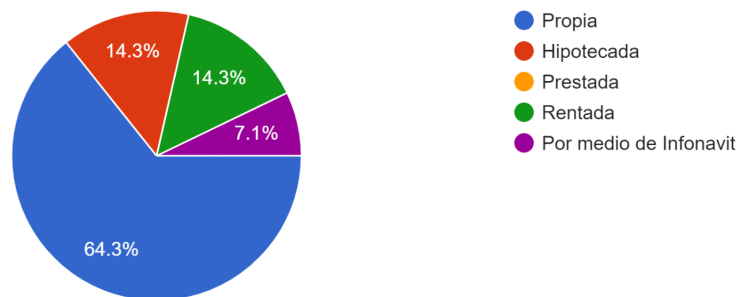
¿De qué material es su techo?

14 respuestas



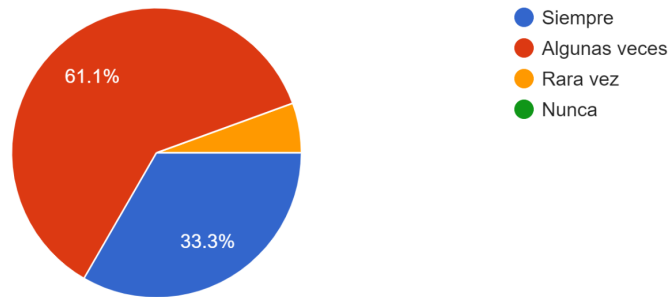
¿Su vivienda es...?

14 respuestas



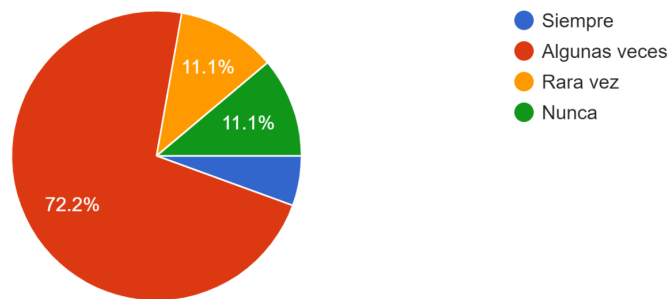
¿Considera que su casa es fría?

18 respuestas



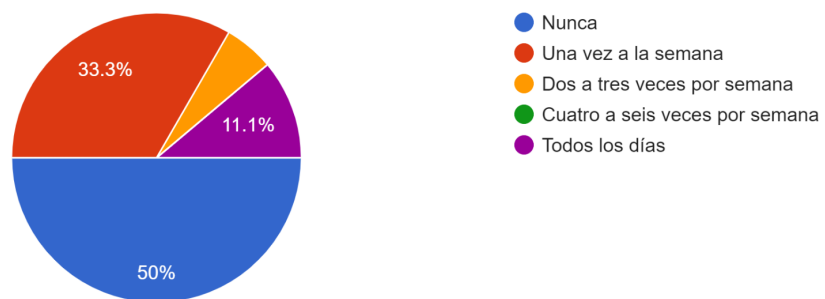
¿Considera que su casa es cálida?

18 respuestas



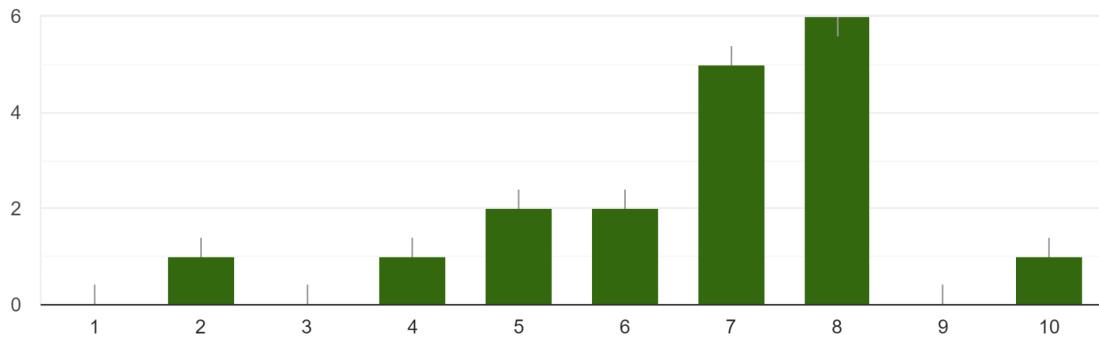
¿Con qué frecuencia hace uso de las áreas comunes de la colonia?

18 respuestas



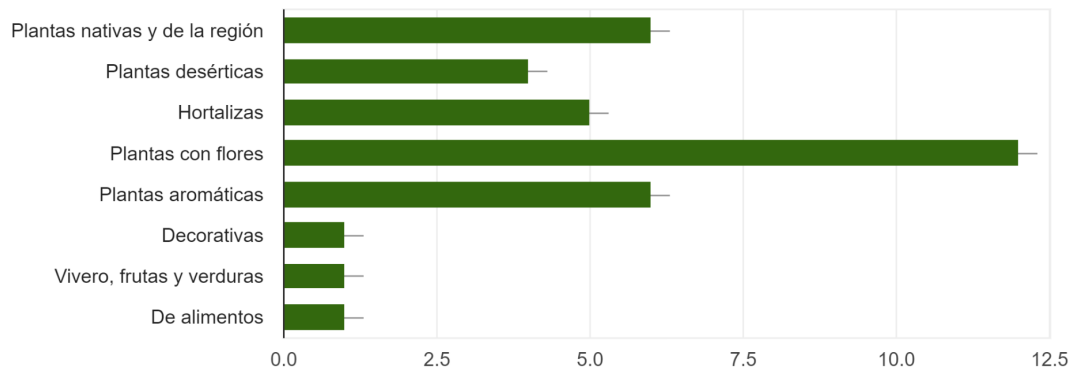
En una escala de 1 a 10 ¿Cómo calificaría la calidad de las áreas verdes de la colonia?

18 respuestas



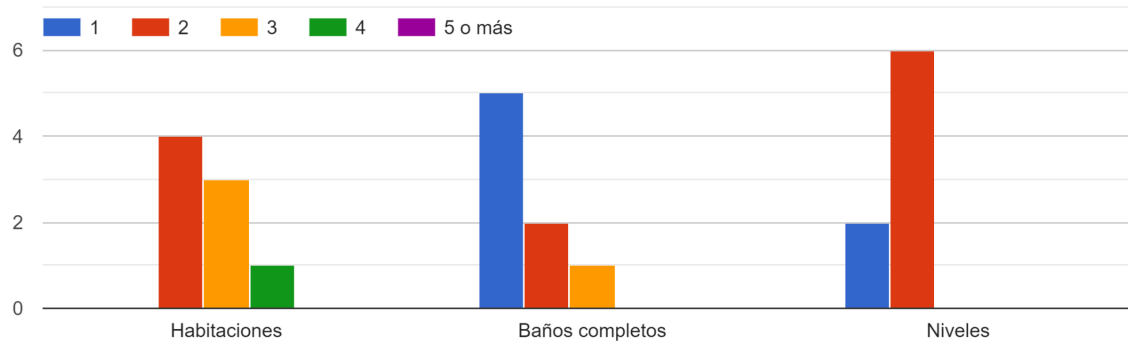
¿Qué tipo de vegetación quisiera tener en un techo verde?

18 respuestas

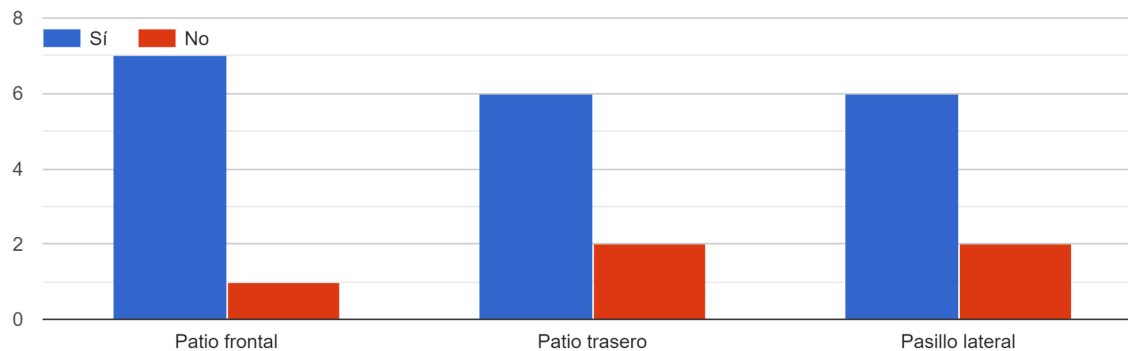


Gráficas de cuestionario de Santa Fe

Indique las características que mejor describan su vivienda

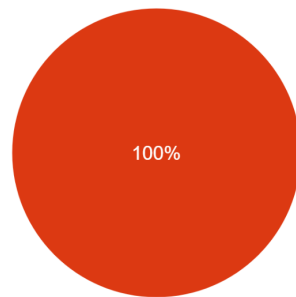


Su casa cuenta con:



¿De qué material es su techo?

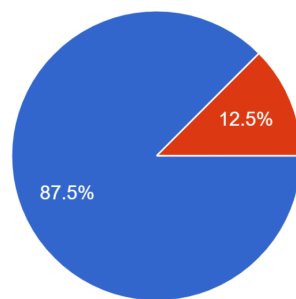
8 respuestas



- Teja
- Concreto
- Madera
- Lamina

¿Su vivienda es...?

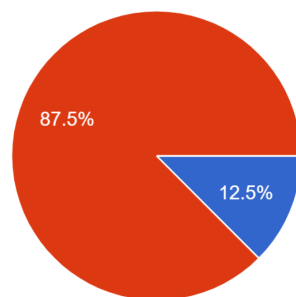
8 respuestas



- Propia
- Hipotecada
- Prestada
- Rentada

¿Considera que su casa es fría?

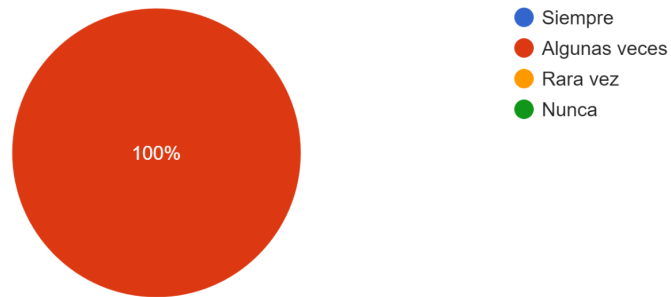
8 respuestas



- Siempre
- Algunas veces
- Rara vez
- Nunca

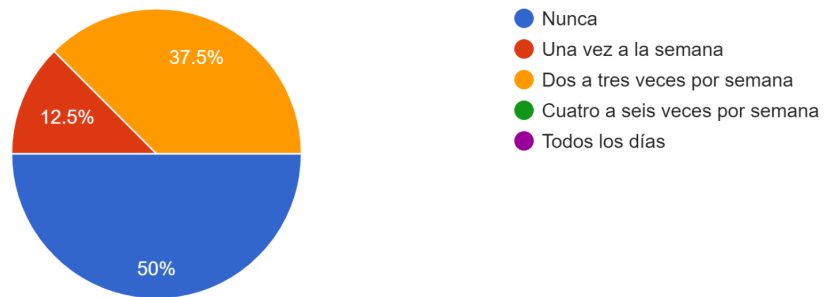
¿Considera que su casa es cálida?

8 respuestas



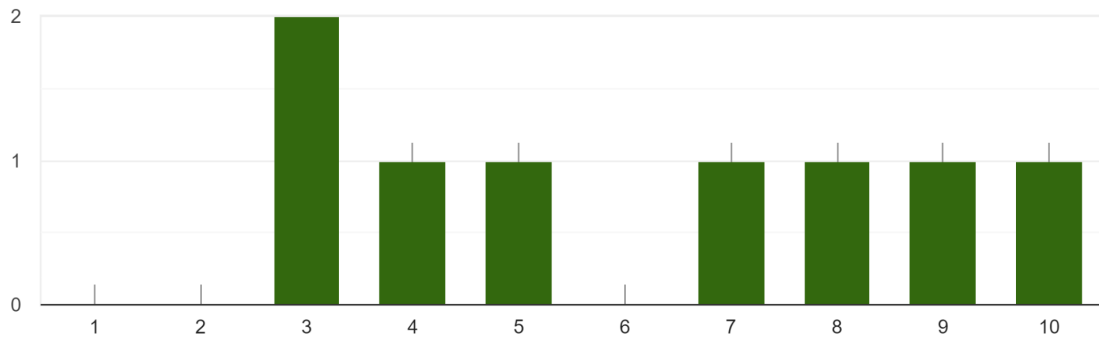
¿Con qué frecuencia hace uso de las áreas comunes de la colonia?

8 respuestas



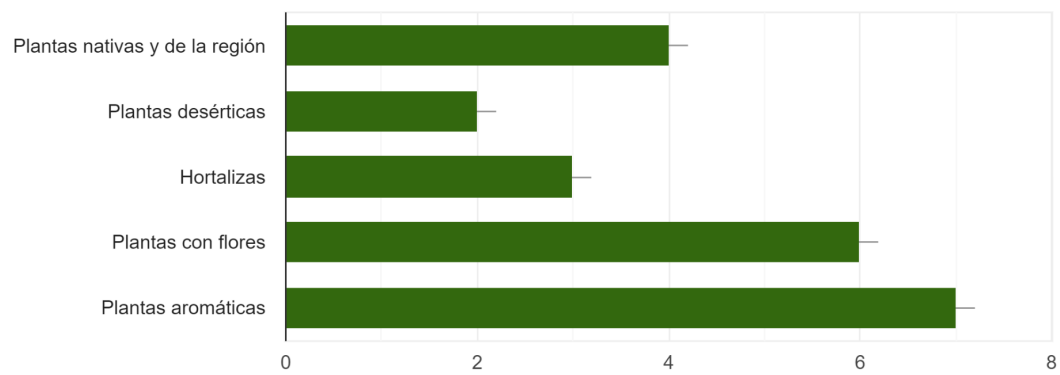
En una escala de 1 a 10 ¿Cómo calificaría la calidad de las áreas verdes de la colonia?

8 respuestas



¿Qué tipo de vegetación quisiera tener en un techo verde?

8 respuestas



Anexo 4 - Cartas de vinculación

27 de septiembre de 2022

Jalisco, México

A quien corresponda:

Un cordial saludo,

El presente documento tiene como objetivo dar constancia de que la estudiante *Daniela Lizette Medina González* de la Maestría en Proyectos y Edificación sustentables del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), realizó una entrevista con *Dra. Lina Ojeda*. Con el fin de determinar aspectos relevantes y colaborar en la investigación de su Trabajo de Obtención de Grado "Propuesta de superficies vegetadas que aporten servicios ecosistémicos y eficiencia energética en la vivienda de Tijuana"

Sin otro preámbulo, extendiendo la presente para los fines que a ella convenga

Atentamente,



Dra. Lina Ojeda Revah
El Colegio de la Frontera Norte

27 de septiembre de 2022

Jalisco, México

A quien corresponda:

Un cordial saludo,

El presente documento tiene como objetivo dar constancia de que la estudiante *Daniela Lizette Medina González* de la Maestría en Proyectos y Edificación sustentables del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), realizó una entrevista con *Monica Erandi Martínez Cordova*. Con el fin de determinar aspectos relevantes y colaborar en la investigación de su Trabajo de Obtención de Grado "Propuesta de superficies vegetadas que aporten servicios ecosistémicos y eficiencia energética en la vivienda de Tijuana"

Sin otro preámbulo, extiendo la presente para los fines que a ella convenga

Atentamente,



Monica Erandi Martínez Cordova.

27 de septiembre de 2022
El Salto, Jalisco, México

A quien corresponda:

Un cordial saludo,

El presente documento tiene como objetivo dar constancia de que la estudiante *Daniela Lizette Medina González* de la Maestría en Proyectos y Edificación sustentables del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), me realizó una entrevista, soy la *Mtra. Yazmin Ochoa González*. La entrevista fue con el fin de determinar aspectos relevantes para la investigación de su Trabajo de Obtención de Grado “Propuesta de superficies vegetadas que aporten servicios ecosistémicos y eficiencia energética en la vivienda de Tijuana”.

Sin otro preámbulo, extiendo la presente para los fines que a ella convenga.

Atentamente,



Mtra. Yazmin Ochoa González

27 de septiembre de 2022

Jalisco, México

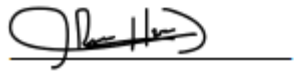
A quien corresponda:

Un cordial saludo,

El presente documento tiene como objetivo dar constancia de que la estudiante *Daniela Lizette Medina González* de la Maestría en Proyectos y Edificación sustentables del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), realizó una entrevista con **Roberto Huber**. Con el fin de determinar aspectos relevantes y colaborar en en la investigación de su Trabajo de Obtención de Grado “Propuesta de superficies vegetadas que aporten servicios ecosistémicos y eficiencia energética en la vivienda de Tijuana”

Sin otro preámbulo, extiendo la presente para los fines que a ella convenga

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Roberto Huber', is written over a horizontal line.

Roberto Huber