

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO



MUROS VIVOS PARA ENFRIAMIENTO PASIVO EN VIVIENDAS DE CONSTRUCCIÓN EN SERIE EN CLIMA CÁLIDO SECO

T E S I S

para obtener el grado de

DOCTORA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Presenta

KARMINA DAMARIS REYES BARAJAS

Directora de Tesis

DRA. CRISTINA SOTELO SALAS

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

OCTUBRE DEL 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

MUROS VIVOS PARA ENFRIAMIENTO PASIVO EN VIVIENDAS DE CONSTRUCCIÓN EN SERIE EN CLIMA CÁLIDO SECO

TESIS PARA OBTENER EL GRADO
DE DOCTORA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

PRESENTA

KARMINA DAMARIS REYES BARAJAS

Correo electrónico UABC: karmina.reyes@uabc.edu.mx

Correo personal: karmina_r25@hotmail.com

Identificador ORCID: 0000-0003-2255-8139

Director de tesis: Dra. Cristina Sotelo Salas

Identificador ORCID: 0000-0001-8685-4290

Co-director de tesis: Dra. Ramona Alicia Romero Moreno

Identificador ORCID: 0000-0002-5853-02-29

Comité tutorial:

Dr. Carlos Javier Esparza López

Identificador ORCID: 0000-0003-0058-5072

Dr. Daniel Antonio Olvera García

Identificador ORCID: 0000-0002-9293-7604

Dr. Daniel Hernández Balbuena

Identificador ORCID: 0000-0002-0055-4797

Código QR vinculado al repositorio virtual del MyDAUD

Mexicali B.C, octubre de 2024

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro que la tesis que se presenta contiene material original que no ha sido presentado para la obtención de un grado académico o diploma en esta u otra institución de educación superior. Así mismo declaro que hasta donde yo sé no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona excepto donde se reconoce como tal a través de las citas.

Mexicali, Baja California a 10 de octubre de 2024

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Karmina Damaris Reyes Barajas', written in a cursive style.

Karmina Damaris Reyes Barajas

Nombre y firma del estudiante



AVAL DE TERMINACIÓN DE TESIS

Fecha: 10 de octubre de 2024

DR. ALEJANDRO JOSÉ PEIMBERT DUARTE
Director de la Facultad de Arquitectura y Diseño
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
Presente.-

Para dar cumplimiento al artículo 106 del ESTATUTO ESCOLAR DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, en su TÍTULO CUARTO DE LOS TÍTULOS PROFESIONALES, GRADOS ACADÉMICOS Y DIPLOMAS, CAPÍTULO ÚNICO, sobre los requisitos para la obtención del grado de **Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño**, como director de tesis en la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento de Arquitectura y Medio Ambiente de la Facultad de Arquitectura y Diseño, se emite la presente acta que avala que el estudiante:

KARMINA DAMARIS REYES BARAJAS

ha concluido su tesis de grado titulada:

MUROS VIVOS PARA ENFRIAMIENTO PASIVO EN VIVIENDAS DE CONSTRUCCIÓN EN SERIE EN CLIMA CÁLIDO SECO

Lo anterior en virtud de que se realizaron las correcciones y recomendaciones del comité tutorial, por lo que ha sido aprobada para el proceso de presentación de examen de grado.

DIRECTOR DE TESIS

DRA. CRISTINA SOTELO SALAS

DEDICATORIA

A ti, mamá Carmen, que “ya no estás en donde estabas, pero estás en todas partes donde estoy yo”, gracias eternas por tu incanzable e incondicional amor.

A mi mamá y hermana, por ser mi mayor fortaleza. Gracias por su amor incondicional, apoyo inquebrantable y por estar siempre a mi lado en cada paso de este camino. Este logro también es suyo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a la **Dra. Ramona Alicia Romero Moreno**, la **Dra. Cristina Sotelo Salas** y el **Dr. Daniel Antonio Olvera García** cuya orientación, conocimiento y paciencia fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Su visión y experiencia me guiaron en cada etapa, brindándome un invaluable apoyo tanto académico como personal. Al **Dr. Daniel Hernández Balbuena** y al **Dr. Carlos Javier Esparza López** por su conocimiento y respaldo en la investigación.

Mi gratitud al **Dr. Aníbal Luna León**, al **Dr. Alejandro Adolfo Lambert Arista**, **Dra. Marlene Zamora Machado**, **Dr. Gonzalo Bojórquez Morales**, quienes a lo largo de mi formación me brindaron las herramientas necesarias para alcanzar este logro. Al director el **Dr. Alejandro José Peimbert Duarte** por su apoyo para la elaboración y desarrollo del experimento.

A mis alumnos de ayudantía, **Gabriela Valenzuela**, **Nahomy Benitez**, **Yonathan Andrade** y **Evelyn Escutia**, por su colaboración en este proyecto. Su entusiasmo y disposición fueron esenciales para superar los desafíos.

A mis amigos: **Gyssel**, **Fernando**, **Axel**, **Kattia**, **Khalil**, **Daniel Araiza**, **Evelyn**, **Fabiola**, **Marisol** y **Frida**, quienes me han acompañado de cerca en este trayecto, su aliento en los momentos difíciles y su compañía en los momentos de celebración hicieron de esta experiencia algo más llevadero y memorable.

Finalmente, agradezco profundamente al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCyT)** por la beca que me permitió realizar mis estudios de posgrado y alcanzar este importante logro. Asimismo, extendo mi gratitud a la empresa *Elite Garden*, a **Héctor Rubén Cárdenas Ríos** por su apoyo clave en la elaboración del experimento, proporcionando recursos, tiempo y conocimientos necesarios.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABLAS	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT	iii
INTRODUCCIÓN.....	4
1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.1. Aspectos Preliminares.....	7
1.2. Planteamiento del problema.....	9
1.3. Justificación	11
1.4. Antecedentes (Estado del Arte).....	13
1.4.1 Confort térmico	15
1.4.2. Consumo energético	23
1.4.3. Ambos (confort térmico y consumo energético)	25
1.4.4. Otras variables de estudio	29
1.5. Preguntas de investigación	34
1.5.1 Pregunta general de investigación	34
1.5.2 Preguntas secundarias	34
1.6. Hipótesis	34

1.7. Objetivos de la investigación	35
1.7.1 Objetivo general	35
1.7.2 Objetivos específicos	35
1.8. Alcances y limitaciones	35
2. MARCO TEÓRICO	37
2.1 Caracterización del muro vivo	37
2.1. Clasificación de los Sistemas Verdes Verticales (VGS)	39
2.1.2 Muro vivo	40
2.2. Características de los VGS	41
2.2.1 Vegetación	41
2.2.1.1 Índice de Área Foliar (LAI).....	43
2.2.1.2 Transferencia térmica	44
2.2.1.3 Estrés hídrico	44
2.2.2 Sustrato	45
2.2.2.1 Tipo de suelo	45
2.2.2.2 Capacidad de campo.....	46
2.2.2.3 Punto de marchitez	46
2.2.3 Sistema de riego	46
2.3. Aplicación del muro vivo en regiones áridas	47
3. MARCO METODOLÓGICO	50

3.1	Diseño de Investigación	50
3.2	Módulos experimentales	51
3.2.1.	Configuración del muro vivo seleccionado	53
3.2.2.	Criterios de selección para la configuración del muro vivo	57
3.2.3.	Módulos experimentales: de referencia y con técnica	58
3.3	Condiciones de la evaluación IN SITU	60
3.3.1	Equipos e instrumentos de medición	62
3.4	Procesamiento de datos	69
4.4.1.	Día Representativo (DR)	72
4.4.2.	Relación de Diferencia de Temperaturas (TDR)	73
4.	RESULTADOS	75
4.1	Desempeño Térmico	75
4.1.1	Temperatura Bulbo Seco (TBS)	75
4.1.2	Temperatura Superficial (TS)	86
4.1.3	Día Representativo (DR)	95
4.1.4	Relación de Diferencias de Temperatura (TDR)	96
4.2	Económicos	100
4.2.1	Valor presente neto (VPN) y costo – beneficio	101
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
5.1.	Conclusiones	103

5.2. Recomendaciones.....	108
REFERENCIAS	113
ANEXOS	122
Anexo 1. Tabla de casos de estudio Estado del Arte.	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación del Estado del Arte.....	14
Figura 2. Consideraciones del muro vivo.....	38
Figura 3. Mapa de zonas áridas en México.....	48
Figura 4. Etapas de la investigación	51
Figura 5. Módulos experimentales.....	52
Figura 6. Módulos experimentales cerrados con EPS.....	52
Figura 7. Estructura metálica	54
Figura 8. Geotextil.....	54
Figura 9. Vegetación A, vegetación B, vegetación C	55
Figura 10. Toma de agua potable, válvulas y reloj	56
Figura 11. Módulos experimentales MR, ME1 y ME2	59
Figura 12. Módulos experimentales para calibración.....	61
Figura 13. Muro referencia sombreado	61
Tabla 5. Períodos de monitoreo	62
Figura 14. a) Sensor TBS y HR.....	64
Figura 15. b) Sensor de temperatura superficial.....	64
Figura 16. c) Estación meteorológica.....	65
Figura 17. Colocación de sensores	66

Figura 18. Ecuación corrección ME2 y R²	70
Figura 19. Ecuación de corrección y R²	70
Figura 20. Escenario A - período 1 (sin sombra).....	76
Figura 21. Escenario A - período 2 (con sombra).....	77
Figura 22. Escenario B - período 1 (sin sombra).....	78
Figura 23. Escenario B - período 2 (con sombra).....	79
Figura 24. Escenario C - período 1 (sin sombra).....	80
Figura 25. Escenario C - período 2 (con sombra).....	81
Figura 26. Escenario D - período 1 (sin sombra).....	82
Figura 27. Escenario D - período 2 (con sombra).....	83
Figura 28. Escenario E - período 1 (sin sombra).....	84
Figura 29. Escenario E - período 2 (con sombra).....	84
Figura 30. Escenario F - período 1 (sin sombra)	85
Figura 31. Escenario F - período 2 (con sombra).....	86
Figura 32. Escenario A - período 1 (sin sombra).....	87
Figura 33. Escenario A - período 2 (con sombra).....	87
Figura 34. Escenario B - período 1 (sin sombra).....	88
Figura 35. Escenario B - período 2 (con sombra).....	89
Figura 37. Escenario C - período 2 (con sombra).....	90
Figura 36. Escenario C - período 1 (sin sombra).....	90

Figura 38. Escenario D - período 1 (sin sombra).....	91
Figura 39. Escenario D - período 2 (con sombra).....	92
Figura 41. Escenario E - período 2 (con sombra).....	93
Figura 40. Escenario E - período 1 (sin sombra).....	93
Figura 42. Escenario F - período 1 (sin sombra)	94
Figura 43. Escenario F - período 2 (con sombra).....	95
Figura 44. Análisis económico ME2	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Vegetación en muro vivo.....	55
Tabla 2. Nombre común y científico.....	56
Tabla 3. Programación de sistema de riego.....	57
Tabla 4. Módulos experimentales.....	59
Tabla 5. Períodos de monitoreo.....	62
Tabla 6. Datos análisis económico - muro vivo.....	68
Tabla 7. Datos para estimar la transferencia de calor (Q).....	68
Tabla 8. Ecuaciones de corrección de ME1 y ME2.....	71
Tabla 9. Datos climatológicos de Mexicali.....	73
Tabla 10. Día Representativo (DR) del período 1 de cada escenario.....	96
Tabla 11. TDR - Escenario A (0.05 m).....	97
Tabla 12. TDR - Escenario B (0.08 m).....	98
Tabla 13. TDR - Escenario C (0.10 m).....	98
Tabla 14. TDR - Escenario D (0.15 m).....	99
Tabla 15. TDR - Escenario E (0.20 m).....	99
Tabla 16. TDR - Escenario F (1.00 m).....	100
Tabla 17. Consumo económico y energético del período cálido.....	101

RESUMEN

“MUROS VIVOS PARA ENFRIAMIENTO PASIVO EN VIVIENDAS DE CONSTRUCCIÓN EN SERIE EN CLIMA CÁLIDO SECO”

En México, el uso de aire acondicionado ha incrementado aproximadamente 30% debido a las crecientes temperaturas y la falta de aislamiento térmico en las viviendas, lo que incrementa las emisiones de carbono y el consumo energético. Por tanto, es esencial implementar medidas que reduzcan estos impactos sin comprometer el bienestar de los habitantes. La investigación tuvo como objetivo evaluar el impacto térmico de un muro vivo continuo con sistema constructivo de bloque de concreto, identificar el espesor óptimo de la cámara de aire y la vegetación adecuada para climas áridos. Se realizaron evaluaciones mediante tres módulos experimentales: de referencia, con sustrato y el muro vivo. El diseño de la estructura utilizada permitió modificar el espesor de la cámara de aire hasta 1 metro para analizar los diferentes espesores, además, se aplicaron criterios de Valor Presente Neto (VPN) y análisis costo-beneficio. Los resultados revelaron diferencias de temperatura operativa interior, relación de diferencia de temperatura, costos monetarios y demanda energética. Se observó una diferencia de temperatura operativa interior de 6°C, reducción de temperatura de bulbo seco (TBS) de más de 8°C, porcentaje de enfriamiento (TDR) hasta 70%, ahorro energético de 37kWh (60%) y ahorro económico de \$23.64 MXN (35%) anuales por m².

Palabras clave: Enfriamiento pasivo, Muro vivo, Vivienda de construcción en serie, Clima desértico y Costo-beneficio.

ABSTRACT

“LIVING WALLS FOR PASSIVE COOLING IN MASS-BUILT HOUSING IN HOT-DRY CLIMATES”

In Mexico, the use of air conditioning has increased by approximately 30% due to rising temperatures and the lack of thermal insulation in homes, which intensifies carbon emissions and energy consumption. Therefore, it is essential to implement measures that mitigate these impacts without compromising residents' well-being. This study aimed to assess the thermal impact of a continuous living wall on a concrete block construction system, identify the optimal air gap thickness, and determine suitable vegetation for arid climates. Evaluations were conducted using three experimental modules: reference, substrate, and living wall. The structural design allowed for adjusting the air gap thickness up to 1 meter to analyze different thicknesses. Additionally, Net Present Value (NPV) and cost-benefit criteria were applied. The results revealed significant differences in interior operative temperature, temperature differential ratios, monetary costs, and energy demand. An operative interior temperature difference of 6°C was observed, along with a reduction of over 8°C in dry bulb temperature (DBT), a cooling percentage (TDR) of up to 70%, energy savings of 37 kWh (60%), and an annual economic saving of \$23.64 MXN (35%) per square meter.

Keywords: Passive cooling, Green wall, Serial construction housing, Desert climate, Cost-benefit.



INTRODUCCIÓN

El cambio climático global ha emergido como uno de los desafíos más urgentes de nuestra época debido a las graves repercusiones sobre la temperatura del planeta y las crecientes emisiones de gases de efecto invernadero. Según datos recientes de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2023), la temperatura global ha aumentado aproximadamente 1.4°C y las emisiones de CO₂ han crecido más de un 45% desde 1990, mientras que México contribuye con alrededor del 1.42% de estas emisiones globales, en donde el sector de la industria manufacturera y de la construcción son responsables del 10% del total de las emisiones nacionales (World Resources Institute [WRI], 2021). Así pues, otro rubro importante a destacar es el consumo energético correspondiente a las viviendas, el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología [Conahcyt] et al. (2022) informó que a nivel mundial es responsable de aproximadamente el 20% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero, mientras que en México esta cifra es de 24%.

Lo anterior, en cuanto a las emisiones que reporta México, se le atribuye principalmente a las ciudades ubicadas en las zonas áridas del país, como Ciudad Juárez, Chih.; Saltillo, Coah.; Victoria de Durango, Dgo; Monterrey, N.L.; San Luis Potosí, S.L.P.; Zacatecas, Zac.; Aguascalientes, Ags.; Culiacán, Sin.; Hermosillo, Son. y Mexicali, B.C., donde la temperatura media anual supera los 18°C y máximas que pueden llegar a sobrepasar los 40°C (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] y Sistema Meteorológico Nacional [SMN], 2023a, 2023b; Secretaría de Salud, 2023), lo que demanda hasta un 15% más de consumo energético en comparación con la mediana nacional (Comisión Nacional



para el Uso Eficiente de la Energía [Conuee], 2020), además, otro factor que contribuye al elevado consumo de energía eléctrica es la falta de eficiencia energética en la envolvente de las viviendas. Esta deficiencia hace que el uso de equipos de enfriamiento mecánico sea indispensable y excesivo. Según el informe de Conahcyt et al. (2022), el enfriamiento mecánico representa hasta el 53% del consumo total de energía en la región.

Por lo tanto, es fundamental implementar acciones que coadyuven las estrategias para combatir el cambio climático y reducir el consumo energético, de acuerdo con la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (ONU, 2015), particularmente el ODS 7 (energía asequible y sostenible) y el ODS 11 (ciudades sostenibles). Estas iniciativas coinciden con los esfuerzos de Conahcyt y Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronaces ECC) (2022) y la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) (2017). Por lo anterior, y con el objetivo de contribuir a los lineamientos del Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (UN-Habitat, 2021) de integrar Sistemas Verdes Verticales en hogares y lugares públicos, es que la presente investigación evaluará el efecto térmico-energético de la implementación de muros vivos en viviendas ubicadas en zonas áridas y realizar un análisis de factibilidad económica.

De acuerdo con diversos autores como Bevacqua et al. (2018); Campos-Osorio (2021); Razzaghmanesh y Razzaghmanesh (2017) y Cuce (2017), la aplicación de muros vivos en viviendas de climas áridos es una estrategia efectiva para mejorar las condiciones térmicas y energéticas. Sus investigaciones indican que pueden reducir la temperatura superficial entre 2-15°C, con beneficios importantes en la temperatura interior, que puede



disminuir hasta 25°C; obtener ahorros energéticos de hasta el 40% y una significativa reducción en el consumo de aire acondicionado de hasta el 60%. Además, tiene beneficios ambientales al reducir el calor sensible, promover el enfriamiento evaporativo y filtrar contaminantes del aire. También mejoran el confort acústico y visual, y se estima que tienen efectos positivos en la salud mental de los ocupantes, al reducir el estrés y mejorar su estado de ánimo.

Para atender las consideraciones anteriores, la presente investigación se dividirá en seis capítulos, el primero abordará los *Antecedentes* de los muros vivos y como subtemas serán *Antecedentes Causales* y *Estado del Arte*; el segundo los Aspectos Preliminares en donde se presentará el planteamiento del problema, las preguntas de investigación, justificación, objetivo general y específicos, metas, alcances, limitaciones y la hipótesis; el tercer apartado corresponderá al Marco Teórico del tema de estudio; en el cuarto se describirán las precisiones metodológicas que se llevaron a cabo para cumplir con los objetivos planteados; el quinto se mostrarán los resultados térmico-energéticos y de factibilidad económica y para finalizar, el sexto, de conclusiones y recomendaciones, donde se discutirán los hallazgos y se plantearán nuevas preguntas de investigación para ahondar en el fenómeno estudiado.



1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

En cuanto, a estudios realizados por la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) y la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), concluyen que el uso de energía en el sector residencial presenta ineficiencias, especialmente en ciudades con climas cálidos. Estas deficiencias energéticas resaltan la necesidad de implementar medidas que permitan reducir el consumo energético y mejorar la condiciones de habitabilidad térmica y reduzcan los costos asociados al uso de sistemas mecánicos de enfriamiento.

Por consiguiente, en el presente capítulo se presentará la situación energética actual, las acciones a nivel mundial y nacional para combatir dicha problemática, así como las estrategias y técnicas de adecuación bioclimática que coadyuvan a promover la eficiencia energética y habitabilidad térmica en el sector residencial.

1.1. Aspectos Preliminares

Aquí se presenta la problemática de la investigación, así como la justificación, alcances y limitaciones para realizarla, asimismo, se describen las preguntas de investigación y los objetivos que se cumplirán. Por último, la hipótesis que se pretende comprobar al culminar la investigación.

Las Naciones Unidas (ONU) en el 2015 aprobaron la Agenda 2030 para los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en donde estableció un plan de acción a favor del planeta, las personas y la prosperidad, con el propósito de promover la paz universal (ONU, 2015). De acuerdo a los ODS planteados, el Objetivo 7 garantizar el acceso a una



energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos, tiene como meta para el 2030 garantizar el acceso universal a los servicios energéticos asequibles y modernos, aumentar la energía renovable y duplicar la tasa mundial de eficiencia energética y el Objetivo 11 de ciudades y comunidades sostenibles, el cual busca mejorar la calidad del aire y suelo (ONU, 2015). Estos ODS se presentaron a nivel mundial, sin embargo, la misma ONU estableció que cada país puede y debe hacer ajustes de metas y objetivos de acuerdo a la situación que cada uno presente.

Con base a lo anterior, México estableció metas adicionales para contribuir al ODS 7, como incentivar la eficiencia energética y aumentar la intensidad energética nacional (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2021). Asimismo, la Secretaría de Energía (SENER), en colaboración con otras instituciones, diseñó estrategias para cumplir con la Ley de Transición Energética, enfocadas en sectores como el industrial, eléctrico, edificaciones, transporte y agropecuario, además de promover ciudades sostenibles. Además, en el sector eléctrico, se propusieron programas para reducir el consumo final, y en construcción, se establecieron normas para nuevas edificaciones y el etiquetado energético de edificios y electrodomésticos (SENER, 2017).

Por lo anterior, el presente estudio contribuye al cumplimiento del Objetivo 7 de las ODS, especialmente en la meta de duplicar la tasa eficiencia energética y, así como en lo propuesto por la SENER, en promover ahorros de consumo final de energía y diseñar estrategias para mejorar el desempeño energético. Esto se logra mediante la mejora de la envolvente de las viviendas de construcción en serie con la técnica del muro vivo. Esta técnica es aplicable tanto en los muros de viviendas existentes para aumentar su eficiencia



energética como en nuevas construcciones, especialmente en aquellas situadas en regiones áridas, como la ciudad de Mexicali.

1.2. Planteamiento del problema

Por lo que se refiere a la habitabilidad térmica, esta es un componente crucial para garantizar la calidad de vida dentro de las edificaciones, particularmente en climas extremos donde las condiciones ambientales naturales y la envolvente impactan directamente el confort de los usuarios. En climas áridos, la temperatura puede exceder los 45°C, y el aumento en la frecuencia e intensidad de las olas de calor, la escasez de agua en la zona y la limitada cobertura vegetal representan un riesgo creciente para la salud pública (Bojórquez et al., 2010; Victorero et al., 2015; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2020; Secretaría de Salud, 2023)(Bojórquez et al., 2010; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos & Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2020; Secretaría de Salud, 2023; Victorero et al., 2015). Así pues, se estima que las temperaturas globales incrementarán con proyecciones de hasta 1.5°C más en los próximos 30 años, lo que demanda una adaptación urgente en las edificaciones (The Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023). Estas condiciones naturales imponen retos para la sostenibilidad energética y el confort térmico, particularmente en las viviendas de interés social que predominan en las zonas urbanas de climas áridos.

Como se mencionó anteriormente, la envolvente de la vivienda también juega un rol determinante en la habitabilidad térmica, pues en estas áreas urbanas, la generación de Islas de Calor Urbano (UHI, por sus siglas en inglés) exacerba las altas temperaturas, especialmente en zonas densamente pobladas debido a los sistemas constructivos



empleados, como el bloque de concreto y la vigueta y bovedilla, por lo que, este fenómeno agrava las condiciones térmicas de las edificaciones, pues incrementa la demanda de sistemas de climatización artificial como el aire acondicionado (AC).

Por lo anterior, las viviendas de interés social, por su diseño compacto y limitada superficie habitable, son particularmente sensibles a estos efectos, pues la relación superficie-volumen, típica de estas construcciones, amplifica la influencia de la envolvente sobre el confort interior, especialmente cuando los materiales y técnicas de construcción no consideran un enfoque bioclimático .

Así pues, diversos estudios han demostrado que las viviendas de interés social en regiones áridas experimentan pocas horas de confort térmico durante el año, con un rendimiento térmico bajo o incluso nulo. Esto obliga a los residentes a recurrir a sistemas de climatización artificial, lo que incrementa el consumo energético y las emisiones de carbono. Asimismo, lo menciona la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, 2020), pues establece que la penetración del AC en el sector residencial ha crecido significativamente en las últimas décadas, ya que ha aumentado más del 50% desde los años 80's. Esto no solo genera un sobre costo para los hogares de bajos ingresos, sino que también ejerce presión sobre la infraestructura eléctrica y contribuye a la degradación ambiental (CONUEE, 2017).

En resumen, la problemática de la habitabilidad térmica en las viviendas de interés social construidas en serie en climas áridos plantea una situación insostenible. La falta de estrategias de diseño pasivo, junto con el aumento en la demanda de refrigeración, lleva al sector residencial a un punto crítico en términos energéticos y ambientales. La necesidad



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de las Américas

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

de implementar soluciones sostenibles, que integren prácticas de diseño bioclimático y técnicas pasivas de enfriamiento, es imperativa para mitigar los efectos de las olas de calor y mejorar las condiciones de vida de los habitantes de estas regiones.

1.3. Justificación

En cuanto a la implementación de estrategias de adecuación ambiental (AA) en el diseño de viviendas en conjunto con la construcción sustentable son esenciales para abordar los desafíos mencionados. Así pues, la integración de técnicas pasivas como el aislamiento térmico, elemento indispensable en los hogares de la ciudades en regiones áridas, pues según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018) más del 50% de las viviendas no cumplen con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011; materiales de bajo costo; construcción con tierra y/o la aplicación de elementos de sombreado como celosías, doble fachadas, Sistemas Verdes Verticales (SVV), entre otros puede contribuir significativamente a reducir el consumo energético y promover la eficiencia energética en regiones con climas áridos.

Así pues, la investigación de sistemas de muros vivos para viviendas en regiones áridas surge de la necesidad de atender los desafíos presentados en dichos entornos, tales como las temperaturas extremas, la escasez de agua y la limitada cobertura vegetal, pues esto provoca que las propuestas de diseño habitacional resulten menos efectivas para proporcionar confort térmico al interior de las viviendas (Victorero et al., 2015). Por lo anterior, y aunado a un estudio realizado por el Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (UN-Habitat, 2021) durante la pandemia de la COVID-19, en donde mostraron que la integración de espacios verdes en los hogares disminuyeron los



reportes de ansiedad y depresión en los usuarios, mismo que destaca Cuce (2017) en su investigación, así pues, la propuesta ha sido de la incorporación de SVV en los hogares y lugares públicos como medida para el cambio climático y para contribuir en mejorar la calidad de vida de los habitantes.

En ese sentido, los SVV, especialmente los muros vivos, han sido identificados como una solución prometedora para disminuir el impacto de los climas áridos en las viviendas. Asimismo, Victorero et al. (2015), Gromke et al. (2015), Lopez-Ordoñez et al. (2022), Bustami et al. (2022) aseguran que estos muros contribuyen a reducir la temperatura interior mediante el proceso de evapotranspiración; mejoran el confort térmico de los edificios en regiones áridas; mitigan el efecto de Isla de Calor Urbano (Urban Heat Island [UHI], por sus siglas en inglés), particularmente relevante en zonas urbanas áridas densamente pobladas y que la reintroducción de vegetación mediante los muros vivos puede colaborar en la disminución del estrés térmico en las regiones desérticas, además, presentan disminución en la demanda de energía mismo que se traduce en ahorro económico para el usuario (Aditya et al., 2022; Campos-Osorio et al., 2020; Ottelé y Perini, 2017; Sheweka y Magdy, 2011).

Por otra parte, los beneficios ecológicos de los muros vivos en regiones áridas también brindan una justificación adicional para la investigación, pues contribuye con la reducción de gases de efecto invernadero, como el Dióxido de Carbono (CO₂), Monóxido de Carbono (CO) y el Dióxido de Nitrógeno (NO₂), incrementa la biodiversidad, disminuye el calor sensible en el medio ambiente, proporcionan enfriamiento evaporativo, incorporan humedad, absorben contaminantes, contribuyen a la mejora de calidad de aire y en el ciclo



de agua urbano, reducen en deslumbramiento y, además, de fungen como barrera para la absorción de ruido (Elgizawy, 2016; Salguero-Gómez et al., 2012), pues debido que las regiones áridas se caracterizan por una limitada cobertura vegetal, la incorporación de muros vivos se vuelve una medida que puede contribuir a la restauración de la vegetación y a la creación de ecosistemas urbanos más habitables.

En conclusión, los hallazgos mencionados resaltan el potencial del uso de SVV, especialmente los muros vivos, para abordar la problemática planteada que enfrentan la ciudades con climas áridos, pues esta técnica contribuye al desarrollo de soluciones habitacionales sostenibles y promueve la eficiencia energética, mitiga los efectos de la UHI y apoya con la iniciativa de la restauración de vegetación en entornos urbanos, lo anterior, brinda sólidos motivos para continuar con el desarrollo de investigaciones sobre la conservación de energía, enfriamiento pasivo y el impacto térmico de los muro vivos en viviendas, especialmente en regiones áridas.

1.4. Antecedentes (Estado del Arte)

En ese sentido, los Sistemas Verdes Verticales (SVV), como los Muros Vivos (MV), han sido objeto de estudio desde diferentes enfoques: consumo energético, confort térmico, ciclo de vida, entre otros. Así pues, los MV han mostrado beneficios importantes en la reducción de la temperatura interior hasta en 6°C, lo cual contribuye al enfriamiento pasivo de las edificaciones y disminuye la necesidad de aire acondicionado, lo que puede traducirse en un ahorro energético de hasta un 30% en climas cálidos. Asimismo, otros estudios sobre los MV establecen que también promueven el ahorro económico, con una



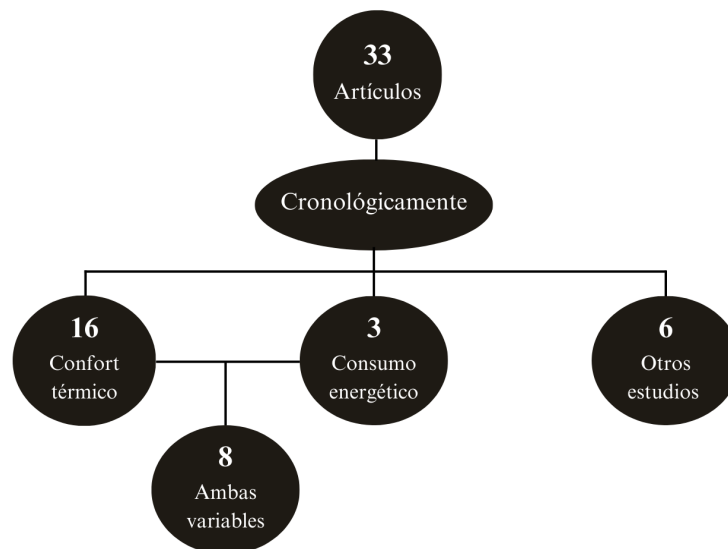
reducción del gasto energético anual entre el 25% y el 35%, lo que resulta beneficioso para los usuarios. Además, se ha observado que estos sistemas reducen el estrés de los ocupantes al mejorar la calidad del aire y crear un entorno visualmente agradable, lo que potencia el bienestar (Feitosa y Wilkinson, 2017; Ghunaim y Kim, 2024).

Por ello, para lograr combatir esa problemática es necesario el uso de técnicas de adecuación ambiental, pues el objetivo de la Arquitectura Bioclimática es hacer uso de las condiciones medioambientales adecuándose al entorno sin dañarlo y proporcionar al usuario condiciones térmicas confortables al interior de las viviendas (Rosales et al., 2017). Con base a lo anterior, en los siguientes apartados se abordarán diferentes enfoques de estudio sobre los beneficios de la integración de Muros Vivos (MV) en las viviendas, tales como: confort térmico, enfriamiento pasivo; consumo energético y otras variables, como el ciclo de vida, viabilidad económica y percepción del usuario (figura 1 y anexo 1).

Figura 1.

Clasificación del Estado del Arte

Clasificación de casos de estudio





1.4.1 Confort térmico

Así pues, diversos autores se enfocaron en la revisión de estudios para el ahorro de energía y el desempeño térmico, en donde hicieron uso de sistemas pasivos únicamente en muros, como el muro trombe, doble fachada, fachadas verdes, muros de hormigón celular aireado y material de cambio de fase. Tal es el caso de la investigación llevada a cabo por Omrany et al. (2016) ellos, a través de la investigación evaluaron la técnica de muro trombe, los muros de hormigón celular y fachada o muro verde, de cual establecieron que se obtienen ahorros en consumo energético y aumento de desempeño térmico en la vivienda, pues mejora la calidad de temperatura interna y al exterior beneficia al medio ambiente, ya que evita la radiación solar directa en la envolvente, además, aporta otros beneficios como el brindar bienestar psicológico en los usuarios, incrementa el valor de la propiedad y, además, existen mejoras acústicas y cambian la imagen del sitio.

Así como otros autores, Šuklje et al. (2016) determinaron, a través de su investigación sobre el desempeño térmico de los Sistemas Verdes Verticales (SVV) como medida de enfriamiento en período cálido para un clima continental, que al considerar las características de las plantas como el factor de cobertura, la transmisividad y el Índice de Área Foliar Vertical entre 6.1 y 7.2, la temperatura superficial disminuye. Además, la temperatura de la superficie es más alta que en la cámara de aire y el enfriamiento resulta efectivo con menor aislamiento térmico en la fachada. Para ello, desarrollaron un modelo matemático e hicieron una validación con los resultados de las pruebas IN SITU con un módulo experimental, el muro orientado al sur lo dividieron a la mitad con una barrera contra el viento, tomaron una parte como referencia y otra para la aplicación la técnica. El



SVV lo armaron con una estructura, una cámara de aire de 0.8 m, utilizaron la planta *Phaseolus Vulgaris L* (planta de frijol) y el sistema de riego automatizado fue colocado en los contenedores. En cuanto a la medición de datos utilizaron células de ensayo térmicas, pirgeómetro y termopares.

Por su parte, Cuce (2017) analizó el muro verde con sistema constructivo de ladrillo, pues él afirma que esta técnica tiene múltiples beneficios, tales como reducir la temperatura interior, el consumo energético y las emisiones de CO₂, son de fácil adaptación con entorno en climas cálidos, y sirve como aislante acústico. El estudio para determinar lo anterior lo llevó a cabo mediante simulación, en donde las variables evaluadas fueron la temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento. Como resultado obtuvo que la temperatura interna disminuye con la planta *Hedera helix* (hiedra).

Así pues, Razzaghmanesh y Razzaghmanesh (2017) evaluaron el desempeño térmico de un muro vivo en un clima mediterráneo en un edificio con fachada oeste. El sistema consistió en paneles de polipropileno reciclado, nueve especies de vegetación y riego por goteo, con un depósito de agua para su reutilización. Además, aun cuando la técnica cubrió solo el 26% del muro, las mediciones tomadas con 12 sensores de temperatura y humedad, mostraron que la temperatura media diaria disminuyó en días cálidos, y en el período frío, el muro vivo mantuvo mayor temperatura diurna; que la evapotranspiración, debido a las plantas, generó un efecto de enfriamiento en el entorno cercano, no mayor a 1 metro y que el muro de referencia siempre registró mayor temperatura.



Mientras que el estudio de Djedjig et al. (2017) sobre el comportamiento térmico e hídrico exterior e interior de los muros verdes mostró que reducen la temperatura media radiante, la del aire interior y la operativa, además de enfriar el aire circundante, lo que genera un efecto de refrigeración. Para medir estos efectos, el experimento se realizó en un complejo habitacional con fachadas orientadas al este y oeste, donde se implementaron muros verdes con esfagno de Chile de 0.15 m de espesor y una cámara de aire de 0.05 m, el sistema de riego fue por goteo automático, mientras que los datos se obtuvieron con sensores de temperatura, humedad y radiación solar.

Por otra parte, Ottelé y Perini (2017) evaluaron la resistencia térmica (valor r) y el desempeño térmico de todo el sistema constructivo con tres técnicas: muro verde directo, muro vivo modular y muro vivo con lana mineral. Las mediciones las realizaron en cámaras experimentales en estado estacionario en condiciones cálidas y frías, con diferente vegetación en cada caso (*Hedera helix*; *Lamium galeobdolon*, *Carex*, *Alchemilla* y *Host*; y las *Ferns*, *Geraniums* y *Carex* respectivamente). En conclusión, determinaron que aplicar *Hedera helix* de manera directa se obtienen temperaturas más cálidas en el período de verano, pues el flujo de calor es menor debido al aumento de resistencia térmica, el muro vivo modular obtuvo mejores resultados de temperatura de aire interior y el muro vivo con lana mineral presentó mayor beneficio para refrigeración.

Otro caso de estudio interesante es el realizado por Yin et al. (2017), ellos evaluaron el muro verde directo en un edificio de oficinas con condiciones climáticas denominadas monzónicas sub-tropicales. El método empleado para el análisis del desempeño térmico y el efecto de enfriamiento fue diferente al resto de las investigaciones analizadas, pues ellos



en su trabajo experimental utilizaron la cámara termográfica y un scanner láser 3D, esto con la finalidad de conocer las características de las plantas, la diferencia espacial de la temperatura de la superficie del muro y de identificar y evaluar el impacto de las plantas. Como resultados obtuvieron que las variables independientes de mayor impacto en esta técnica para lograr enfriar es la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad de viento, además, que este fenómeno se da debido al efecto de sombreado que genera la vegetación y que existe una reducción de temperatura superficial.

Por otra parte, un estudio en donde se evaluó el aislamiento térmico en combinación con la fachada verde o muros vivos, es la investigación realizada por Olivieri et al. (2017), ellos buscaron disminuir el consumo energético, a través de la reducción de ganancias de calor, por lo que, recomiendan la aplicación de esta técnica en conjunto con los SVV. Para establecer dicho criterio realizaron un trabajo experimental en donde recolectaron los datos climatológicos de una edificación destinada para actividades de oficina en el cual se encontraba inhabitado en un clima mediterráneo, los datos fueron tomados e ingresados a un programa de simulación para su validación y posteriores análisis con espesores de 0.03 m a 0.13 m de poliestireno extruido. Con los resultados obtenidos concluyeron que el espesor adecuado es de 0.07 m. y que el aislamiento térmico con espesor por arriba de 0.09 m resulta ineficiente.

Sánchez-Reséndiz et al. (2018) realizaron mediciones in situ para evaluar el desempeño térmico de muros vivos modulares en un clima semiárido. Aplicaron la técnica en un módulo experimental de ladrillo recocido con fachada sur, comparándolo con un módulo testigo, para ello, utilizaron sensores de temperatura y humedad en ambos módulos,



tanto en el interior como en el exterior. El muro vivo se construyó con rejillas de plástico, malla geotextil y una cámara de aire de 0.12 m. Los resultados mostraron que el retraso del flujo de calor en el muro vivo aumentó entre una y dos horas, mejora la habitabilidad térmica y logra menores temperaturas interiores en el período cálido, la técnica fue menos efectiva en invierno y que implica una inversión económica relativamente baja.

Por otro lado, en la investigación realizada por Feria-Díaz et al. (2019) identificaron los tipos de enfriamiento pasivo más beneficiosos para distintos climas en América Latina a partir de una revisión bibliográfica. Clasificaron las técnicas en protección térmica, modulación térmica y disipación de calor. Para la protección térmica analizaron diseño paisajístico, vegetación activa, y sombreado; en modulación térmica, técnicas para reducir ganancias de calor; y para disipación de calor, métodos convectivos, evaporativos y radiativos. Concluyeron que la vegetación interior mejora el confort térmico, y los muros verdes disminuyen la temperatura, aunque sin una percepción inmediata debido al estado de crecimiento inicial, además, identificaron que en estos países la técnica de enfriamiento pasivo en los edificios es escasa, por lo que, recomiendan realizar más estudios.

Asimismo, en el estudio de Netam et al. (2019), se evaluaron las técnicas de muro y cubierta verde, junto con el sombreado en viviendas de bajo ingreso, para analizar su impacto en la temperatura interior con ventanas abiertas y cerradas. Utilizaron simulaciones para medir el rendimiento térmico, en donde consideraron variables como radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del aire. Tras ajustar los datos en un programa de simulación, previo a mediciones térmicas de la vivienda prototipo seleccionada, concluyeron que el tamaño de las ventanas no afecta significativamente la temperatura



interna y que, aunque la temperatura nocturna en verano disminuye, no es suficiente para alcanzar el confort térmico adecuado.

Así pues, Sendra-Arranz et al. (2020) se enfocaron en el análisis de las variables ambientales como la irradiación y temperatura del aire para determinar si existen diferencias significativas de temperatura superficial con la aplicación de la técnica de muro verde indirecto y en que orientación (sur u oeste) presenta menores temperaturas. La investigación la realizaron mediante monitoreo térmico durante tres años en un edificio existente con termopares, piranómetros y estación meteorológica. El sistema constructivo del muro verde consistió en el muro existente de hormigón, una cámara de aire de 0.20 m, una lámina metálica perforada en donde colocaron 24 tipos de vegetación, así conformaron un sistema modular con geotextiles, cada módulo contenía 16 plantas, el sistema de riego que utilizaron fue a través de la exudación. Así determinaron que la mejor orientación para colocar el muro verde es la sur.

Por otro lado, en el estudio de Pan et al. (2020), se evaluó el rendimiento térmico de ocho especies vegetales en un clima sub-tropical húmedo, analizando características como altura, número de hojas, área foliar, cobertura, y ángulo de la hoja. Usaron jardineras modulares con sustrato de alta retención de agua y un sistema de riego controlado. Los resultados mostraron que Ficus elástica tuvo el mejor desempeño térmico, con una máxima reducción de temperatura, aunque registró mayor consumo de agua. Se concluyó que las plantas con alto índice de área foliar (LAI) y hojas pequeñas son más eficaces para generar superficies vegetales frías. Además, los SVV disminuyen el calor conductivo, brindando mayor ahorro energético.



Al igual que Sánchez-Reséndiz et al., Shafiee et al. (2020) realizaron la investigación experimental con validación por simulación sobre muros vivos en un clima cálido y semi-árido, sin embargo, ellos se enfocaron en el estudio del efecto de la técnica en el fenómeno de isla de calor urbana. El tipo de muro vivo elegido fue el conformado por paneles de polipropileno separado en ocho partes, las plantas seleccionadas fueron cuatro tipos. Para las mediciones IN SITU utilizaron sensores en la cámara de aire, para registrar la temperatura ambiental y la humedad relativa durante 10 días, por otra parte, utilizaron un simulador en el que se pueden evaluar los edificios a escala urbana. Los resultados de esta investigación demostraron que el muro vivo con paneles redujo la temperatura del aire durante las horas de luz solar, en las horas pico de calor disminuyó y que si el espesor de la cámara de aire aumenta la reducción de grados centígrados disminuye.

Por otra parte, Nan et al. (2020) estudiaron el desempeño térmico (temperatura y humedad interior) del muro vivo en el período frío. Así pues, el diseño del experimento consistió en cuatro contenedores: uno lo tomaron de referencia y en los otros tres colocaron el muro vivo (maceteros suspendidos con sustrato) al norte y sur. El sistema lo crearon con estructura de metal; para el sustrato utilizaron turba, cáscaras de coco, barro amarillo y piedra volcánica; la vegetación que utilizaron fueron tres tipos de bambú y 10 plantas (tres leñosas, cuatro hierbas, dos trepadoras y una especie de bambú). Con base en sus hallazgos, concluyeron que los muros vivos, utilizando diversas especies vegetales, mejoran el ambiente térmico interior y pueden emplearse como un efectivo aislamiento térmico durante el período cálido y que esta técnica no es tan eficiente durante el invierno.



Nugroho (2020) realizó una extensa revisión sobre fachadas verdes y muros vivos con el objetivo de definir y clasificar los distintos tipos de Sistemas Verdes Verticales (SVV) y determinar su configuración óptima para climas tropicales. Con ello, identificó dos tipos principales de fachadas o muros verdes: directa (vegetación en el muro) e indirecta (con cámara de aire y estructura para la vegetación) y los muros vivos con tres métodos: continuo, modular y lineal. Con lo anterior y con base a una medición de los muros vivos en una vivienda existente, concluyó que los muros vivos requieren un mayor costo debido al sistema de riego, pero reducen la temperatura superficial y que son más eficientes con cámaras de aire más pequeñas.

Así pues, en general, los autores evaluaron diferentes tipos de temperatura, entre ellas la temperatura superficial del muro del SVV empleado y del muro de la envolvente, la temperatura media interior, la ambiente y la temperatura interior, así como el flujo de calor conductivo del muro.

De los cuales, en la mayoría de las investigaciones ellos estudiaron el comportamiento de la temperatura superficial, por lo que, aseguran que con la implementación de la técnica puede existir una diferencia de 25 – 30°C, sin embargo, ocho de ellos coinciden en que la diferencia ronda entre 0.5 - 10°C. La temperatura media interior fue evaluada en dos casos y uno determinó que se obtienen entre 5-10°C menos, mientras que otro hasta 25°C. En el análisis de la temperatura ambiente, tres autores establecieron que se puede obtener hasta 5°C de menos y otros tres hasta 10°C. Por último, la mayoría de los autores que evaluaron la temperatura interior aseguran que existe una reducción hasta de 5°C, mientras que uno mostró que se pueden obtener 10°C menos. En el



caso de análisis del flujo del calor conductivo en el muro, un autor concluyó que disminuye más 50% y otro menos 50%.

1.4.2. Consumo energético

Según Bevacqua et al. (2018), al implementar la estrategia de enfriamiento pasivo bajo las técnicas de cubierta verde y muro vivo se logran ahorros energéticos por enfriamiento así como ahorros en la demanda de energía anual. Para determinar lo anterior, realizaron un estudio de ambas técnicas mediante simulación con dos tipos de climas (mediterráneo y cálido) en una vivienda con un valor U del sistema constructivo de 0.353 W/m²°C y una consigna del sistema de aire acondicionado de 20°C (calefacción) y 26°C (refrigeración). Los resultados que obtuvieron mostraron que, en el caso de la vivienda evaluada en el clima cálido, el consumo de energía por enfriamiento disminuye si no hay aislamiento térmico o si este es menor a 0.05 m, además, los datos de esta variable dependen la cobertura de la vegetación en los muros y del índice de superficie foliar, pues al aplicar la técnica en el muro sur, este y oeste se observó una reducción energética, sin embargo, identificaron que si solo se integra en el muro sur no se presentan ahorros significativos. Por lo que, ellas concluyeron que el muro vivo mejora las condiciones de confort térmico interior y reduce consumo energético en las viviendas.

Por otra parte, en la revisión bibliográfica se encontró una investigación sobre muros verdes la cual fue elaborada por Campos-Osorio et al. (2020), el enfoque dado fue para evaluar el desempeño energético de la técnica y estimar la disminución de los gases de efecto invernadero (GEI) en un clima cálido seco extremo. Dicho análisis se llevó a cabo de manera experimental en un edificio existente con sistema constructivo de muro de



bloque de concreto sin aislamiento térmico, la planta seleccionada fue la *Buganvillea brasiliensis* (*Buganvillea*), esto debido a que es un arbusto trepador que requiere poco consumo de agua para sobrevivir, lo cual resulta pertinente por las condiciones climáticas de la ciudad. La vegetación fue colocada en el muro oeste (el de mayor exposición de radiación solar) y como caso testigo utilizaron el mismo muro, pero con una separación de 1 m² del sistema de muro verde. Como conclusión mostraron que la implementación de la técnica presenta disminución de flujo de calor por muro, asimismo, comprobaron que es posible reducir la demanda de energía por enfriamiento (uso de aire acondicionado).

Por último, en la investigación realizada por Chàfer et al. (2021) realizó un estudio experimental sobre el impacto ambiental y energético que tiene las técnicas de muro verde y fachada verde en un clima mediterráneo. Ellos evaluaron las opciones en módulos de 3x3x3 m, los tres contaron con el mismo sistema constructivo, uno lo tomaron como referencia y en los otros integraron el muro y la fachada verdes, además, incorporaron un sistema de climatización artificial para el análisis energético. Si bien el estudio se enfocó en determinar el impacto ambiental de todas las fases del ciclo de vida, también determinaron que en el período cálido la reducción de consumo energético es significativa y que la opción óptima para este caso es el muro verde, además, la selección de los materiales y el tipo de vegetación para la aplicación de las técnicas es fundamental, así como considerar siempre el uso de fertilizantes para el mantenimiento y durabilidad de la flora.

En cuanto al estudio de la variable de consumo energético, los autores lo clasificaron en ahorros energéticos y ahorros anuales. En tres casos establecieron que al aplicar esta técnica de SVV en la envolvente de la vivienda se puede presentar un reducción



de consumo energía eléctrica entre el 15 - 30%, mientras que un solo caso de estudio asegura que puede ser entre 45 – 60%. Por otra parte, está la evaluación del ahorro de consumo energético anual, donde se observa que dicho beneficio es desde el 3% hasta el 40%.

1.4.3. Ambos (confort térmico y consumo energético)

En ese mismo contexto, Dahanayake y Chow (2017) investigaron el impacto del consumo energético de los muros vivos a través de un modelo matemático con la validación de un software de simulación térmico-dinámica para diferentes tipos de clima y lo relacionaron con un estudio experimental existente. En el método empleado de balance térmico consideraron las propiedades físicas y térmicas de la capa de vegetación (LAI, altura de la vegetación, albedo, sustrato, la emisividad de onda larga de la planta y sustrato, la resistencia de la hoja, la conductividad térmica del sustrato y la tasa de evapotranspiración) y las ambientales (Temperatura de bulbo seco, radiación solar, velocidad del viento y temperatura de rocío), estos datos los ingresaron al simulador. Los resultados arrojaron que los muros vivos reducen la temperatura superficial exterior en períodos cálidos, el consumo energético por refrigeración anual, sin embargo, en período frío, debido a la carga por calefacción, el consumo energético incrementa, por lo tanto, recomiendan utilizar la técnica para ciudades con climas cálidos.

Asimismo, Perini et al. (2017) realizaron un estudio experimental en un proyecto piloto sobre la capacidad de enfriamiento de los SVV para disminuir la demanda de energía eléctrica por los sistemas de climatización artificial en clima mediterráneo, un análisis. La metodología empleada fue la siguiente: el SVV lo instalaron en el muro sur del edificio



existente con sistema constructivo de mampostería y poliestireno (valor U de 0.44 W/m²K); las variables evaluadas fueron la temperatura superficial exterior, radiación solar, temperatura del aire y humedad relativa, cabe destacar que introdujeron el aire exterior mediante conductos de 0.08 m de diámetro. Por otra parte, el SVV utilizado fue un muro vivo de paneles compuesto por dos capas de geotextil, en él integraron 20 diferentes especies de enredaderas y arbustos, mientras que el sistema de riego fue una línea de goteo en cada panel. Con estas consideraciones, los resultados fueron los siguientes: la temperatura superficial del muro existente logra estar por debajo del muro del caso de referencia; la introducción del aire provoca que la humedad relativa se mantenga en niveles aceptables al interior y que presentaron ahorros de consumo energético.

Así como Bhamare et al., Licón-Portillo et al. (2017) evaluaron el uso de vegetación como sistema pasivo de enfriamiento, ellos identificaron que tanto la densidad como el área foliar influyen en la mitigación de temperatura, además, determinaron que cualquier tipo de vegetación coadyuva a la reducción de consumo energético y CO₂, así como al confort térmico.

Por otra parte, la investigación elaborada por Wahba et al. (2018) se enfocó en la evaluación, mediante de simulación, del desempeño térmico – energético de la técnica de cubierta y muro verde en un clima árido cálido en un edificio residencial con sistema constructivo de muros de ladrillo de 0.12 m y 0.25 m. Para lograr el estudio mediante el programa Design Builder, fue necesario obtener los datos de las propiedades del sistema de vegetación, tales como la profundidad y conductividad del suelo, la densidad, altura, conductancia y carbono incorporado de la planta, mientras que en los análisis se consideró



el 100% de cobertura vegetal de cubierta y muro con espesor de 0.15 m en la vegetación. Al final, concluyeron que el espesor de la vegetación óptimo es de 0.15 m y que este tipo de técnicas brindan ahorros energéticos y de CO₂, aumentan las condiciones de habitabilidad térmica y, si durante el período cálido se proporciona una temperatura interior moderada, la envolvente verde aumenta la evapotranspiración y por lo tanto, enfría el aire circundante.

Por otra parte, una de las investigaciones en donde se evaluó tanto el consumo energético como el confort térmico de los muros verdes fue el realizado por Convertino et al. (2019), ellos mencionan que aparte de los ahorros de demanda energética y el aumento del desempeño térmico al interior de la vivienda, éstas tienen múltiples beneficios para los usuarios, mismos que se mencionaron anteriormente. Sin embargo, la investigación se enfocó en el estudio de la temperatura externa del aire y lo que ocurre hasta la capa de vegetación, es decir, en la transferencia de calor convectivo que se producen entre estas dos capas. Asimismo, mostraron que la temperatura externa siempre era mayor que la temperatura de la capa de vegetación, lo que representa que las plantas ganaban energía.

Mientras que, la investigación realizada por Bhamare et al. (2019), al igual que las anteriores, muestra que el uso de técnicas de enfriamiento pasivo en cualquier tipo de edificación obtiene resultados favorables tanto térmica como energéticamente. Pues afirman que es indispensable, primero, analizar el clima de la ciudad, el tipo de uso del edificio y el desempeño de la técnica pasiva a implementar. Además, muestran que la aplicación de vegetación activa en un edificio con enfriamiento pasivo puede llegar a reducir la temperatura interna y los ahorros energéticos. Sin embargo, toda esta revisión



bibliográfica fue de distintos países y ciudades con diferentes tipos de climas, además, recomiendan que se realice un estudio económico de la aplicación y mantenimiento de las técnicas, pues, por ejemplo, la de fachadas o techos verdes implicaría, en algunos casos, un costo elevado del sistema de riego.

Asimismo, Li et al. (2019) llevó a cabo un estudio para evaluar el desempeño energético y el efecto de enfriamiento de las fachadas verdes en los muros de la envolvente en un clima sub-tropical húmedo. El análisis fue mediante un programa de simulación con la semana crítica del período cálido, evaluaron tres casos uno con muro verde; otro de muro vivo con sistema modular y otro con un sistema denominado súper suelo, el cual fue creado por el Dr. Qi, mismo que consiste en un suelo nutritivo compuesto de perlita, ceniza volcánica y fibras, tiene una alta capacidad de retención de agua (76%) y es un material ligero. De los resultados de las evaluaciones obtuvieron el caso de mayor beneficio sería el muro vivo con súper suelo, seguido del muro vivo modular y, por último, el muro verde. Sin embargo, los autores recomiendan, conocer de manera amplia el desempeño de las técnicas, evaluaciones en todo el año y que se consideren los edificios contiguos.

En el caso de estudio realizado por Hoffmann et al., (2021) analizaron la temperatura superficial de los muros para poder obtener resultados de flujo de calor con diferentes espesores de aislamiento y distintos niveles de exposición con la técnica de muros verdes indirectos para un clima continental húmedo y otro continental. El análisis lo llevaron a cabo mediante un modelo numérico, utilizaron las especificaciones de la planta *Phaseolus Vulgaris L* (planta de frijol), consideraron la capa homogénea del muro verde en dos orientaciones (sur y oeste), la cámara de aire fue de 0.08 m, además, hicieron una



validación con datos experimentales tomados de la investigación de Šuklje et al. (2016). En los resultados obtuvieron que el muro sur representa mayor consumo de energía durante el día, mientras que la orientada al oeste lo proyecta en la noche, por lo que, las mayores reducciones de temperatura se dan cuando se aplica la técnica en el muro sur, la temperatura superficial también se redujo, asimismo presentó ahorros energéticos.

1.4.4. Otras variables de estudio

Por otro lado, Yazdanseta (2017) elaboró un estudio en el que evaluó el potencial de enfriamiento pasivo de la técnica de muro verde indirecto a través de la transpiración de la vegetación para seis diferentes climas, esto lo realizó mediante la simulación de un modelo matemático denominado Penman-Monteith (P-M), el cual sufrió ajustes por la autora. Así pues, consideró los rasgos biofísicos de las plantas (radiación neta absorbida, resistencia aerodinámica, resistencia del dosel), las variables climáticas y las escalas temporales. Los resultados mostrados establecen que para que la velocidad del viento influya en el enfriamiento la altura del dosel debe ser de tres metros, a partir de los seis es mínimo el beneficio, además, que el mejor clima para aplicar este tipo de técnica es el cálido seco, seguido del cálido.

Asimismo, existen investigaciones en las que no solo se evalúa el desempeño térmico y/o energético, tal es el caso de la elaborada por Li et al. (2021), pues lo que buscaron obtener fue la identificación de patrones óptimos de las fachadas verdes para mejorar las condiciones de habitabilidad térmica en el período cálido y frío a través de parámetros generales físicos, químicos y biológicos calculados por las Temperaturas Fisiológicas Equivalentes (PET, por sus siglas en inglés), esta variable considera la



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de las Américas

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

temperatura del aire interior en la que se equilibra el calor del cuerpo humano. Por lo que, el método utilizado en el estudio fue mediante simulación y monitoreo térmico de un muro de referencia, uno verde modular, otro lineal y la fachada verde (cobertura total del área), todos con el mismo tipo de vegetación. Los resultados mostraron que el muro verde modular presenta mayores beneficios medioambientales y de PET habitables (desde “ligeramente frío” a “ligeramente caliente”), sin embargo, establecieron que las PET catalogadas como “muy frías” se prolongaron para el muro verde modular y para el lineal en invierno. Por consiguiente, determinaron que el muro verde modular y el lineal son los adecuados para climas cálidos, mientras que para climas fríos resulta conveniente la aplicación de la técnica con cobertura completa del área.

Otra investigación que resulta interesante debido al enfoque que tuvo, es la llevada a cabo por Carbajal-Avila et al. (2016), pues ellos analizaron la percepción del usuario respecto a la técnica del muro verde indirecto ubicado en un edificio existente. El SVV fue conformado por una estructura metálica, una cámara de aire de 0.05 m, utilizaron dos enredaderas diferentes y el sustrato estaba compuesto por piedra tepetate, fibra de coco, humus de lombriz y abono de hoja, además, un dato importante que presentaron fue el costo por metro cuadrado, el cual fue de aproximadamente \$104 USD (\$2,153.84 MXN). Así pues, para el estudio aplicaron encuestas a 124 estudiantes, de las respuestas obtuvieron que el 71.8% percibió más fresco el ambiente, el 16.1% sintió calma; el 18.5% dijo limpia el aire y el 17% que tiene beneficios estéticos; el 39.5% comentó que esta técnica debe aplicarse en las viviendas y el 28.2% en escuelas; en cuestión económica el 69.4% piensa



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de la Paz

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

que es viable su aplicación y el 92.7% se mostró interesado en conocer más acerca de técnica, lo cual indica que es un potencial de aplicación en las edificaciones.

Asimismo, Oquendo-Di Cosola et al. (2020) presentó una investigación en la que estudiaron el ciclo de vida y el impacto ambiental de los muros vivos. Para ello, evaluaron mediante un simulador el impacto de cada una de las fases (fabricación, construcción y mantenimiento) durante 10 años de vida útil en dos sistemas diferentes; uno con módulos de plástico y el otro con geotextiles. La información recolectada para el análisis la obtuvieron de la base de datos del simulador, el cual está basado en el método de punto medio del Sistema Internacional de Datos del Ciclo de Vida de Referencia (ILCD, por sus siglas en inglés). El diagnóstico arrojó que el SVV con módulos de plástico resultó menos dañina para el medio ambiente; la fase con mayor impacto ambiental es la de fabricación, mientras que la fase de construcción es la de menor influencia, el recurso hídrico tuvo menor impacto ambiental con la implementación de geotextil. Así pues, los autores recomiendan la aplicación de la técnica con módulos de plástico para obtener un menor impacto ambiental, sin embargo, recomiendan que cualquier técnica puede optimizarse si se utilizan materiales reciclado, naturales y creados en el lugar de estudio.

Otra investigación distinta fue la realizada por van de Wouw et al. (2017), quienes evaluaron la recolección por precipitación y la evapotranspiración de un muro vivo modular y otro por geotextiles en un clima oceánico templado, con el propósito de determinar los cambios del balance hídrico interno para lograr estimar la cantidad de agua necesaria. Con el estudio determinaron que los factores que influyen en el aumento del contenido del agua y masa son el riego y la recolección de precipitación por lluvia o rocío, y los que



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de las Américas

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

contribuyen al ahorro son la escorrentía, el flujo transversal y la evapotranspiración. Por otra parte, identificaron que el muro vivo con sistema modular recolecta mayor precipitación con el 26.5%, mientras que el sistema modular alcanzó una potencia de evaporación de 23 W/m² y el de geotextil de 21 W/m², por lo tanto, concluyeron que las fachadas verdes funcionan como un sistema de enfriamiento pasivo el cual se activa cuando aumenta la radiación solar.

Asimismo, se consideraron estudios en donde se evaluaron otras variables en sus investigaciones, en uno de ellos se analizó la percepción del usuario, este estudio lo realizaron mediante encuestas, en donde los usuarios expresaron que sentían el ambiente más fresco, que los diferentes colores de las plantas les llaman más la atención, asimismo creen económicamente factible la aplicación de la técnica. Otro más evaluó la evapotranspiración y otro la precipitación de la vegetación y sustrato. Uno más el ciclo de vida, en donde determinaron que la fase de construcción es la de menor impacto al medio ambiente. Y otro más realizó una evaluación económica de la implementación de la técnica, en este caso establecen que el costo monetario ronda entre los \$130 - \$260 dólares por metro cuadrado, sin embargo, puede variar según la ciudad en la que se vaya aplicar el SVV, pues tanto los materiales que se utilicen (vegetación, estructura, sustrato) como el sistema de riego influyen en el precio.

En síntesis, a partir de las investigaciones analizadas sobre los Sistemas Verdes Verticales (SVV) para determinar si estos contribuyen a la mejora de las condiciones de habitabilidad térmico-energética de las viviendas se concluye que esta técnica para evitar el sobrecalentamiento en la envolvente resulta efectiva y prometedora, pues con la



incorporación del muro vivo en la envolvente de la vivienda se puede obtener 40% de ahorro energético, hasta una reducción de consumo energético por el uso de aire acondicionado del 60% y lograr una diferencia hasta de 10°C de temperatura interior.

Conjuntamente, esta técnica tiene beneficios ambientales, tales como: disminución del calor sensible; propician el enfriamiento evaporativo; incorporan humedad al ambiente, lo que contribuye favorablemente al ciclo de agua urbano, mismo que se ve afectado por los materiales impermeables con los que se pavimenta el suelo y, además, absorben los contaminantes encontrados en el aire, lo cual favorece tanto al medio ambiente como al usuario. Asimismo, presentan beneficios acústicos; pues absorben el ruido; de confort visual, ya que reducen el deslumbramiento y, a su vez, cambian la imagen de sitio e incluso, diversos estudios aseguran que puede tener beneficios psicológicos en el usuario, pues se dice que la implementación de vegetación reduce el estrés y hasta puede llegar a mejorar el estado de ánimo.

Por consiguiente, a partir de las investigaciones analizadas, se encuentra que los muros vivos se han centrado en aspectos como el ahorro energético, confort térmico y el efecto de evapotranspiración, lo que ha ampliado el conocimiento sobre los mecanismos de enfriamiento pasivo y su potencial para reducir la temperatura interior y superficial en las edificaciones. Sin embargo, estos presentan sesgos y limitaciones, ya que la mayoría se han realizado en climas templados o tropicales, donde los sistemas de riego son manejables y los efectos de enfriamiento evidentes.

Por lo tanto, aún persisten interrogantes en cuanto al rendimiento térmico y energético de la técnica cuando se aplica en edificaciones con distintos sistemas



constructivos o bajo condiciones climáticas extremas, como el clima desértico, donde las demandas de enfriamiento y los patrones de evaporación difieren sustancialmente. Además, la falta de datos a largo plazo sobre su impacto económico y de sostenibilidad es un nicho de investigación no abordado completamente.

1.5. Preguntas de investigación

1.5.1 Pregunta general de investigación

¿Cuál es el efecto de enfriamiento pasivo de un muro vivo en las condiciones de habitabilidad térmica en viviendas en serie en climas áridos?

1.5.2 Preguntas secundarias

- a. ¿Qué características físicas debe tener un muro vivo aplicado en viviendas de construcción en serie?
- b. ¿Cuál es el desempeño térmico de un muro vivo en la vivienda de construcción en serie?
- c. ¿Cuál es el costo beneficio de la implementación de un muro vivo en viviendas de construcción en serie en climas áridos?

1.6. Hipótesis

El diseño e implementación de un sistema de enfriamiento pasivo que permita la reducción de las ganancias de calor por conducción y radiación solar directa, que propicie las pérdidas de energía por convección y la evapotranspiración, como el muro vivo,



aplicado en los muros de vivienda de construcción en serie en climas áridos aumenta la habitabilidad térmica y disminuye su consumo energético.

1.7. Objetivos de la investigación

1.7.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de enfriamiento pasivo de un muro vivo en vivienda en serie en climas áridos

1.7.2 Objetivos específicos

- a. Diseñar el muro vivo óptimo para los muros de la vivienda de construcción en serie en regiones áridas
- b. Estimar el desempeño térmico del muro vivo en la vivienda de construcción en serie en regiones áridas a partir del trabajo experimental.
- c. Establecer escenarios de desempeño económico de un muro vivo para vivienda de construcción en serie.

1.8. Alcances y limitaciones

Los alcances de este trabajo de investigación son conocer el efecto térmico y cómo beneficia térmica-energéticamente la instalación de un muro vivo continuo en viviendas construidas en serie en áreas con climas áridos. Asimismo, se busca obtener un análisis de costo-beneficio para determinar si implementar esta técnica de adecuación ambiental es viable para este tipo de vivienda. Además, se determinará la configuración óptima del muro vivo en función de los resultados de costo-beneficio, así como de su desempeño térmico y



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de las Américas

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

energético. Así pues, se identificará qué tipo de vegetación es más adecuada para resistir las variaciones estacionales del clima, el sistema de riego, el sustrato, los intervalos de fertilización y sus componentes.

Por otro lado, entre las limitaciones del estudio se encuentra la necesidad de contar con espacio disponible para construir los módulos experimentales, así como con albañiles y recursos económicos suficientes para la elaboración. Además, otro aspecto importante es el período de evaluación del muro vivo, dada a la crítica situación climática en la ciudad de Mexicali, donde los meses cálidos generan una mayor demanda energética debido al uso de sistemas de enfriamiento mecánico en comparación con los meses de periodo frío en los que se utilizan sistemas de calentamiento artificial (CONAVI, 2013; Luna, 2016), se optó por el estudio de la técnica únicamente los meses de mayo a octubre, por lo tanto, las mediciones IN SITU se podrán llevar a cabo únicamente una vez al año.



2. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presentará la información general de los sistemas verdes verticales (SVV): la clasificación y concepto para definir el tipo de SVV; la caracterización, tipos, configuración, los componentes de los muros vivos; beneficios y aplicaciones, así como las consideraciones que se deben tomar en cuenta para la implementación de SVV en regiones climáticas áridas.

2.1 Caracterización del muro vivo

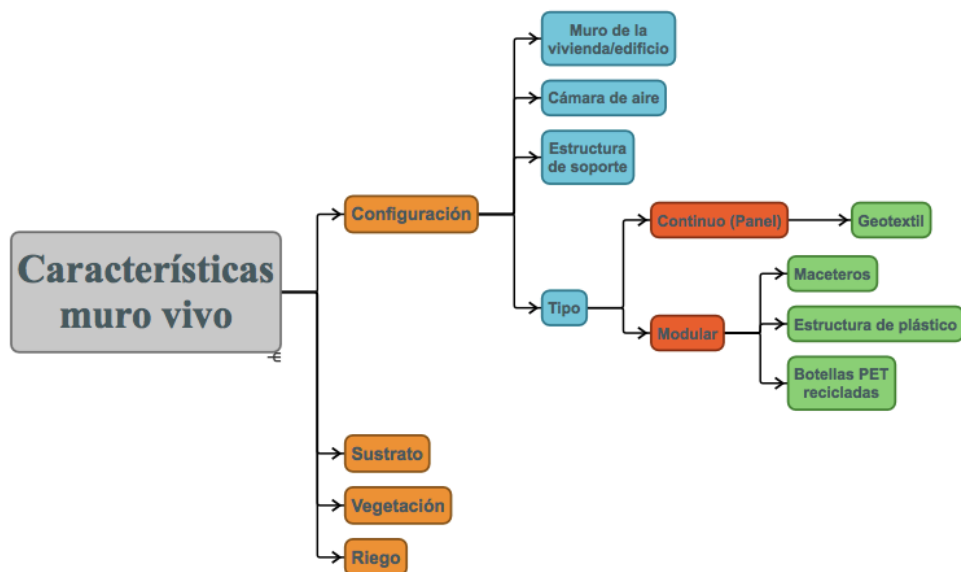
Según Manso y Castro-Gomes (2015), el término de muro vivo es un reciente descubrimiento, pues se adoptó por la necesidad de integrar vegetación en los muros de edificaciones con gran altura y que esta misma quedara cubierta de forma rápida y con un crecimiento uniforme de la vegetación utilizada.

Asimismo, tras investigaciones y prácticas realizadas se dieron a conocer dos tipos de muros vivos con diferentes configuraciones en su elaboración (figura 2), estos dos son el muro vivo continuo y el muro vivo modular. La principal diferencia entre ambos es que en el continuo se utiliza un geotextil que en su cara frontal forma sacos para así colocar la vegetación, mientras que, en el modular, tal y como su nombre lo dice, se compone mediante módulos, es decir, contenedores individuales, los cuales funcionan como maceteros. Asimismo, dentro de la clasificación del muro vivo modular existen diferentes tipos, como bandejas/recipientes diseñados exclusivamente para este sistema, botellas PET reciclada, maceteros o bolsas flexibles (Manso y Castro-Gomes, 2015; Minke, 2012; Nugroho, 2020).

Por otra parte, el muro vivo debe cumplir con ciertas características: estos deben tener una separación entre el muro del edificio o vivienda y el muro vivo, llamado cámara de aire; una estructura de soporte; vegetación, la cual puede estar compuesta por diferentes tipos de plantas; sustrato o medio de crecimiento, este dependerá del tipo de muro vivo que se emplee y el sistema de riego (Abd Ghafar et al., 2018; Manso y Castro-Gomes, 2015; Minke, 2012; Rajak y Kumar, 2022; Wang, et al., 2022). Otras consideraciones que se deben tener en cuenta al momento de elaborar un muro vivo, principalmente es elegir el tipo de muro más apropiado según el lo que se desee obtener y tipo de clima, además de la instalación, el drenaje o filtración de agua de las plantas y el mantenimiento.

Figura 2.

Consideraciones del muro vivo





2.1. Clasificación de los Sistemas Verdes Verticales (VGS)

Por lo anterior, es importante clasificar y diferenciar los tipos de Sistemas Verdes Verticales (Vertical Greenery Systems [VGS] por sus siglas en inglés) existentes. Según Manso y Castro-Gomes (2015) el término que comúnmente se utiliza para referirse a ésta técnica es el *muro verde*, aunque otros autores también los identifican como *biomuros*, *jardín vertical* o *Sistemas Verdes Verticales* (Abd Ghafar et al., 2018; Bass y Baskaran, 2001; Elgizawy, 2016; Francis y Lorimer, 2011; Minke, 2012; Reyna y Molar, 2017). Así pues, en general los autores los nombran conforme su criterio, sin embargo, en el presente trabajo se adoptó una clasificación basada en la literatura revisada. Por consiguiente, los VGS se pueden clasificar en dos grupos: muros verdes y muros vivos.

En cuanto a los muros verdes, estos tienen como principal característica el medio de crecimiento, es decir, aun cuando existen dos tipos de muros verdes, ya sea el directo o el indirecto, el medio de cultivo para la vegetación proviene desde el origen de la plantación, se utilizan plantas trepadoras (muro verde directo) o enredaderas (muro verde indirecto). Si es indirecto se incluye una estructura para el crecimiento de la vegetación para que funcione como soporte y guía para la enredadera, debe tener una separación entre el muro de la vivienda y/o edificación y la estructura de soporte para la planta.

Por otro lado, el muro vivo tiene una configuración diferente, pues aunque sea de tipo continuo o modular siempre tiene que existir un espacio (cámara de aire) entre el muro de la vivienda o edificación; debe llevar una estructura anclada directamente al muro para que sirva de soporte para el medio de crecimiento, según el tipo de muro vivo que se elija;



el sustrato deber ir en cada espacio así como la planta, por lo tanto se puede combinar la vegetación que se vaya a emplear.

2.1.2 Muro vivo

El muro vivo es un tipo de Sistema Verde Vertical (VGS) que se utiliza mayormente cuando se desea cubrir de vegetación el muro de forma rápida, pues debido a sus características y configuraciones, éste permite colocar distintos tipos de vegetación de manera individual, ya sea en los bolsillos del geotextil del muro vivo continuo o bien en los recipientes/maceteros en el tipo modular e incluso se puede elaborar un diseño con la misma vegetación.

Por otra parte, el muro vivo en cualquiera de sus dos opciones se compone de diferentes capas, la primera es el muro de la envolvente de la vivienda o edificio; la segunda, debe ser una cámara de aire entre el muro de la envolvente y muro doble formado por el muro vivo, esta separación puede ser de diferentes dimensiones, desde 0.1 hasta 1.00 metro o más, esto dependería de las condiciones climáticas del sitio y de lo que se desee evaluar; la tercera capa está compuesta por la estructura que soportará el geotextil o los módulos con el sustrato y vegetación, ésta elaborarse de perfil metálico o de PVC; la cuarta, corresponde al tipo de muro vivo seleccionado, es decir, si es el continuo el geotextil se fijará a la estructura, en caso de ser modular, se fijarán los recipientes o maceteros, una vez anclado el soporte, se añadirá el sustrato y la vegetación, ya sea nativa o adaptada, esto para que sobreviva a los cambios climáticos de la ciudad (Manso y Castro-Gomes, 2015; Nugroho, 2020; Rajak y Kumar, 2022).



2.2. Características de los VGS

De acuerdo con diversos autores (Bartesaghi et al., 2018; Hunter et al., 2014; Safikhani et al., 2014), al analizar los beneficios térmicos y energéticos de los Sistemas Verdes Verticales (VGS), se deben considerar cada capa que comprende el muro vivo para así evaluar la transmitancia térmica, es decir, se tomarán los datos de espesor, coeficiente de conductividad térmica y resistencia térmica del geotextil; el sustrato; vegetación; cámara de aire y sistema constructivo del muro de la envolvente de la vivienda (Miguel et al., 2017).

Por lo anterior, resulta indispensable contar con una caracterización adecuada tanto de la vegetación que se utilizará en el muro vivo como del sustrato. En cuanto a la vegetación se deben obtener valores que determinen la resistencia de la especie vegetal al clima, el porcentaje de cobertura de cada planta y sus características principales, por otra parte, del sustrato también se deben conocer tanto sus componentes (tipo de suelo, materia orgánica y agregados inorgánicos), el punto de marchitez (PM) y la capacidad de campo (CC), de tal manera se logrará tener valores para poder trabajar con fórmulas y/o simuladores térmico-dinámicos para contar con resultados térmicos y energéticos del efecto de la integración de vegetación en los muros de las viviendas mediante la técnica de muros vivos (Arvizu, 2018).

2.2.1 Vegetación

Un elemento de suma importancia en los muros vivos es la selección de vegetación, ésta siempre debe ser elegida de acuerdo con el clima de la ciudad, pues de ello depende



que las plantas resistan las condiciones ambientales locales, por tal motivo es recomendado que la vegetación sea, preferentemente, nativa o adaptada. Aunado a lo anterior, también se debe considerar la demanda de agua que requiere cada planta que se utilizará en el muro vivo, pues sin el riego correcto, ya sea exceso o escasez, la planta también puede morir (Minke, 2012).

Otra consideración para la correcta elección de la vegetación es la orientación en la que se colocará la técnica de muro vivo, pues ciertas plantas se catalogan como plantas de sol, de media sombra o de sombra, asimismo, hay algunas que aun cuando resisten las condiciones climáticas de la ciudad no todas se pueden colocar durante todas las estaciones del año, esto debido a que unas son exclusivamente para el período cálido y otras para el período frío, además es necesario considerar el crecimiento de la raíz y de la flora, ya que sería perjudicial para el desarrollo del muro vivo la invasión de una planta con otra (Vázquez, 1991).

Por lo anterior, la correcta selección de la vegetación para el muro vivo, como en cualquier caso, es clave para su adecuado funcionamiento y desempeño térmico y energético. El clima y la ubicación geográfica son criterios que se deben tener en cuenta al momento de elegir las plantas para el muro vivo, así de esta manera se podrá conocer que vegetación es nativa y/o adaptada, pues tal y como se mencionó anteriormente, resulta indispensable saber el tipo de exposición (sombra, media sombra, sol), el peso y el tipo de riego de cada planta, pues las plantas que se empleen en estos sistemas verdes verticales, deben ser capaces de resistir a las condiciones climáticas extremas de frío y calor que se dan en las regiones áridas de la república mexicana, asimismo, idealmente deben contar con



una expectativa de vida larga, es decir, que requieran una mínima cantidad de nutrientes, sean capaces de retener grandes cantidades de agua (soporten sequías) y que sean de poco mantenimiento, por tal motivo, generalmente se agregan plantas xerófilas y/o perennes (Palacios, s/f).

Por consiguiente, se recomienda evaluar las características de la vegetación que se va a implementar, estas son: Índice de Área Foliar (LAI), del cual con su análisis se conocerán las características del follaje y el factor de cobertura; estrés hídrico y transferencia térmica, pues con ello se obtendrá la caracterización de cada especie vegetal.

2.2.1.1 Índice de Área Foliar (LAI)

Como se mencionó anteriormente, el índice de área foliar (Leaf Area Index [LAI], por sus siglas en inglés) es una variable de análisis para obtener una completa caracterización de la vegetación que se utilizará en el muro vivo. El LAI, sirve para conocer el crecimiento de las plantas y productividad del cultivo, sin embargo, para poder llevar a cabo el análisis de esta variable es necesario estimar el área específica foliar (AEF), en la que también se ve involucrada el área foliar y el peso seco foliar. En otras palabras, la LAI es el resultado de la superficie foliar respecto a la superficie de suelo ocupado por la planta, por tal motivo, el LAI será diferente para cada planta, pues varía según el tipo de vegetación que se emplee y de las condiciones climáticas de la ciudad de estudio (Rodríguez et al., 2017).



2.2.1.2 Transferencia térmica

Por otra parte, el análisis de la transferencia térmica se lleva a cabo para determinar el impacto térmico que produce la implementación del muro vivo (MV) como capa activa en los muros de las viviendas, sin embargo, como es un elemento vivo se debe considerar la resistencia térmica, el flujo de calor, la temperatura superficial y la conductividad térmica de todos los materiales que conforman el muro vivo, así como los de la envolvente de la vivienda, esto además de las variables ambientales como la radiación, temperatura del aire, la emisividad y la nubosidad. Lo anterior se evalúa en conjunto con una vivienda de referencia, es decir, una que cuente con de las mismas características y condiciones de sistema constructivo en muros que en la que se agregó el muro vivo, esto con la finalidad de observar el beneficio térmico que se obtiene con el MV (Machado et al., 2000).

2.2.1.3 Estrés hídrico

Como se mencionó en la sección 2.2.1 *Vegetación*, un factor que es indispensable evaluar sobre las plantas que se colocarán en el muro vivo (MV) es el estrés hídrico, pues es una de las causas principales por las que las plantas se marchitan y mueren, pues se produce cuando la transpiración de la planta sobrepasa el agua absorbida por las raíces, es decir, ocurre cuando no se da el riego adecuado y por lo tanto, hay poca disponibilidad de agua en el suelo y/o sustrato. Así pues, llegar al punto de estrés hídrico en la vegetación influye en el crecimiento de tallo, altura, área foliar y raíces, pues reduce la capacidad de desarrollo, lo que eventualmente provocará la muerte de la planta (Luna-Flores et al., 2012).



2.2.2 Sustrato

Por otra parte, en este tipo de técnicas en las que se utilizan elementos vivos como la vegetación, el sustrato se vuelve un elemento fundamental, ya que es el medio de crecimiento de las plantas, pues es el conductor de nutrientes y de abastecimiento de agua, además, se encarga de dar soporte a las mismas y oxígeno a las raíces. Por lo anterior, es importante conocer y elegir adecuadamente cada componente que lo integra, y aunque esto pueden variar según las condiciones climáticas de la región, estos incluyen materia orgánica como turba; fibra de coco; cáscara de arroz; corteza de pino; aserrín; paja de trigo; estiércol; humus de lombriz, y agregados inorgánicos como arena; vermiculita; piedra pómez; arcilla expandida; partículas de poliestireno expandido, entre otros (Palacios, s/f).

Por otro lado, cuando se obtenga el sustrato elaborado, es importante conocer y analizar otras variables para la caracterización del éste, tales como el peso; el tipo de suelo; capacidad de campo (CC); punto de marchitez (PM) y conductancia.

2.2.2.1 Tipo de suelo

Así pues, conocer bien el tipo de suelo que se utilizará como componente para elaborar el sustrato del muro vivo es de suma importancia pues es el elemento principal, así pues, si no se cuenta con un suelo fértil será necesario agregar materia orgánica y fertilizantes para que subsistan los cultivos (Gonzalez et al., 2009), además, es fundamental saber el drenaje interno, es decir, la capacidad de almacenamiento de agua, éste se conocerá con la evaluación de la capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PM) que resulte



del tipo de sustrato que se emplee para nutrir las raíces de la vegetación del muro vivo (Tamara y Ducuara, 2016).

2.2.2.2 Capacidad de campo

Por otra parte, la capacidad de campo (CC) resulta una variable indispensable para poder conocer el sustrato y, como ya se mencionó anteriormente en el apartado 2.2.2.1 *Tipo de suelo*, ésta depende del tipo de suelo que se utilice, pues representa el contenido de humedad, en otras palabras, es la capacidad máxima de almacenamiento de agua. Asimismo, la CC está directamente relacionado con punto de marchitez (PM), pues al evaluar la variable de CC automáticamente se conocerá el PM (Arvizu, 2018; Tamara y Ducuara, 2016).

2.2.2.3 Punto de marchitez

De acuerdo a lo mencionado por Tamara y Ducuara (2016), el punto de marchitez (PM) es lo contrario a la capacidad de campo (CC), es decir, el potencial hídrico más negativo que se da en la evaluación del tipo de suelo y/o sustrato, pues de este PM las raíces de la vegetación ya no logran extraer agua y por lo tanto las hojas logran recobran la turgencia y mueren. El valor del PM depende de las condiciones climáticas y la conductividad, por lo que, no es un valor constante, pues varía según los componentes que se utilicen en el sustrato (tipo de suelo, fertilizantes).

2.2.3 Sistema de riego

De los sistemas de riego que se utilizan para los muros vivos está el sistema hidropónico o el que se da por goteo, sin embargo, el de mayor uso es el de goteo. La



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de las Américas

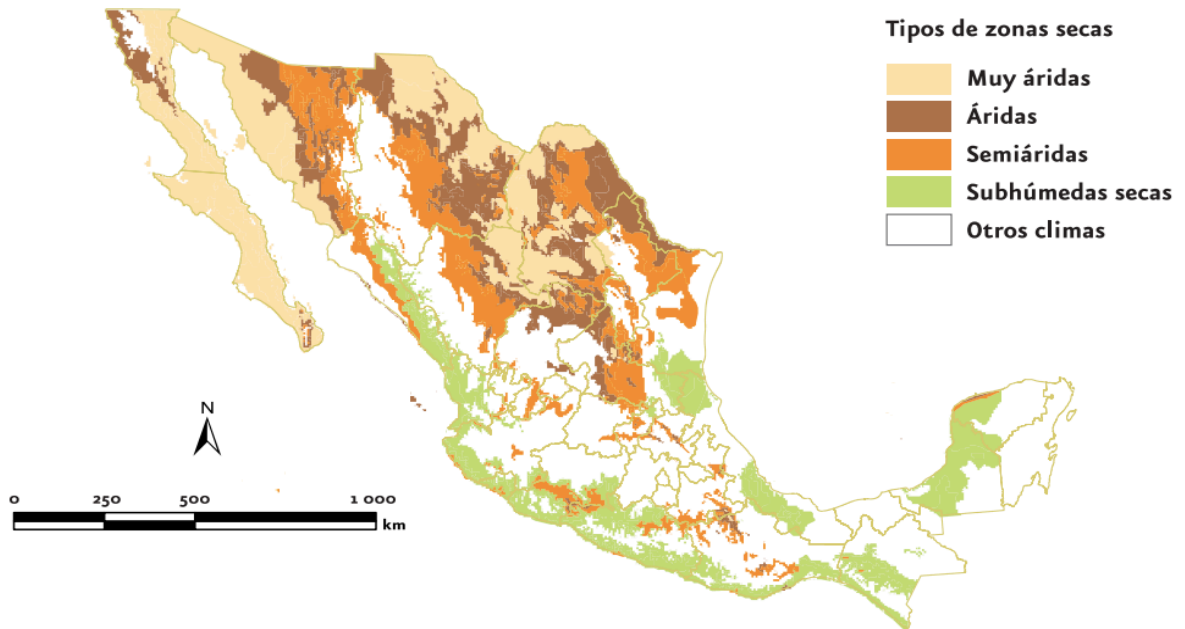
MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

instalación puede ser con diferentes materiales, sin embargo, comúnmente se hace uso de tubos de PVC de 16 mm de diámetro para conectar la fuente principal/llave con las líneas instaladas en el muro vivo y de los goteros que van instalados en dirección de cada espacio o módulo. Por otra parte, el agua que se utilice para el riego puede ser reciclada o directamente de la que se capte por lluvias, aunque si es directamente de la llave esta debe tener bajo contenido de cal o bien, incorporar filtros al sistema de riego para obtener la calidad de agua adecuada para el riego y mantenimiento de la vegetación. Asimismo, para garantizar la correcta humedad del sustrato se pueden integrar sensores para activar el riego de forma automática, así como una bomba y canaletas para recolectar y reusar la misma cantidad de agua durante la implementación del muro vivo (Manso y Castro-Gomes, 2015; Minke, 2012; Wang et al., 2022).

2.3. Aplicación del muro vivo en regiones áridas

Las regiones áridas se refieren a las zonas denominadas con climas secos, éstas a nivel global comprenden el 30.3%, mientras que en México representan más del 50% del territorio nacional, pues sus principales características son la escasa precipitación anual (257 – 792 mm) y las temperaturas extremas tanto en período cálido como en el frío (diferencias de 7 a 14 °C o más entre períodos), además, se destaca por brindar riqueza de flora y fauna (Hernández y García, 1997). Estos estados del territorio mexicano que se encuentran bajo la región climática árida son Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Nuevo León, Sonora y Baja California (figura 3).

Figura 3.
Mapa de zonas áridas en México



Nota. Distribución de las zonas secas en México, 1996. Tomado de *Informe de la situación del medio ambiente en México* (p. 27), por SEMARNAT, 2008.

Por lo anterior, y por lo mencionado en el apartado *2.2.1 Vegetación* es fundamental identificar el tipo de vegetación y características para la implementación de plantas en el muro vivo. De acuerdo con algunos autores (González, 2012; Minke, 2012) la vegetación adecuada para las ciudades de regiones áridas es la xerófila, en ella se incluyen árboles, arbustos, matorrales, enredaderas, trepadoras, cactáceas o bien, plantas adaptadas que son las que resisten a las sequías, es decir, son las cuales pueden soportar el déficit de lluvia.



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de las Américas

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

Así pues, algunos investigadores han analizado la aplicación de muros vivos en regiones áridas, allí determinaron que la integración de la técnica en las viviendas y/o edificaciones resulta efectiva para contribuir en la mejora de las condiciones de habitabilidad térmica, pues llega a reducir hasta 10°C de temperatura interior, y en disminuir el consumo energético hasta un 60% solo por el uso de aire acondicionado, además, para su aplicación evaluaron características de la vegetación como las que se mencionan en el apartado 2.2 *Características de los VGS* (Arvizu, 2018; Campos-Osorio et al., 2020; Halawa et al., 2018; Reyna y Molar, 2017; Sánchez-Reséndiz et al., 2018; Shafiee et al., 2020).

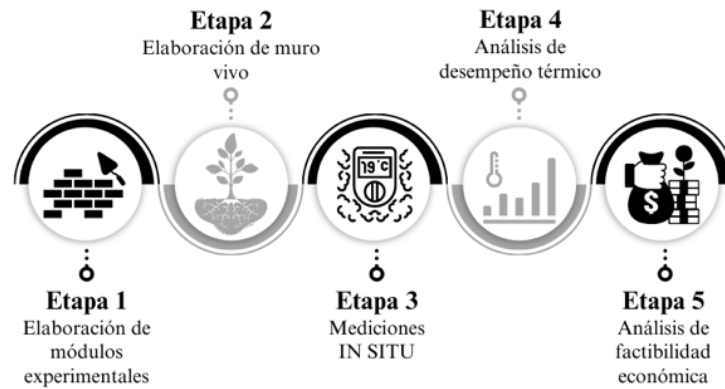


3. MARCO METODOLÓGICO

Según Vásquez (2016), el método es el proceso mediante el cual el trabajo de investigación se desarrolla para poder cumplir con los objetivos, comprobar la hipótesis planteada y/o sirve para dar respuesta al problema. Así pues, en el presente capítulo se desarrolla el diseño de la investigación; se describe el proceso de diseño y elaboración de los módulos experimentales, así como la configuración correspondiente al tipo de muro vivo elegido; las evaluaciones previas de vegetación y sustrato; las condicionantes para la evaluación térmica por medio de mediciones IN SITU; la evaluación económica y, finalmente, se presenta el procesamiento de datos.

3.1 Diseño de Investigación

La presente investigación tiene un enfoque de estudio cuantitativo, pues se siguió un proceso secuencial en donde, primero, se llevaron a cabo mediciones térmicas para, posteriormente, analizar los resultados mediante métodos estadísticos. Para lograr cumplir con los objetivos y metas planteadas se dividió en etapas el diseño de la investigación, en donde la primera etapa correspondió a la elaboración de los módulos experimentales con la implementación del muro vivo continuo; la segunda etapa estuvo a cargo de las evaluaciones IN SITU del muro con sustrato, el muro vivo continuo, el muro de referencia y el sombreado, todas ellas realizadas en período cálido; en la tercera etapa se realizaron nuevamente las evaluaciones IN SITU en período cálido, por último, en la cuarta etapa se llevó a cabo el análisis de factibilidad económica (figura 4).

Figura 4.*Etapas de la investigación*

3.2 Módulos experimentales

Para evaluar el comportamiento térmico del muro vivo y determinar su efecto en la conservación de energía de un espacio interior, para ello, se diseñaron tres módulos experimentales, a partir de la revisión del estado del arte, donde las consideraciones principales para la observación del fenómeno fueron el sistema constructivo y la altura del módulo.

Así pues, se construyeron tres muros cortos de bloque de concreto de 0.15 m, mismos que se encuentran orientados al sur, con la finalidad de utilizar dos muros para la evaluación del muro vivo (uno con vegetación adaptada y otro con sustrato) y el otro como módulo testigo o de referencia, en el que, en ciertos periodos, se le colocó una sombra para evaluar dicha técnica. Para la elaboración, se realizó una cimentación con profundidad de 0.40 m; se levantó un firme de 1.00 m de ancho por 0.65 de largo con 0.10 m de alto y, por último, se desplantó el muro con un ancho de 1.00 y 2.40 m de altura (figura 5).

Posteriormente, para lograr realizar mediciones térmicas en los muros, se dejaron 0.50 m de espacio interior para la colocación de los sensores, pues se instalaron, a manera de cajón, unas placas de poliestireno extruido de 0.0508 m (2") para cerrar y aislar el muro (figura 6).

Figura 5.

Módulos experimentales



Figura 6.

Módulos experimentales cerrados con EPS





3.2.1. Configuración del muro vivo seleccionado

Como se menciona en la sección 2.1 *Caracterización de muro vivo* existen dos tipos de muro vivo el continuo o el modular, para su elección se debe considerar el clima de la ciudad, en el caso de la ciudad de Mexicali, la cual está ubicada al norte de la República Mexicana a una latitud de 32°39'48"N y longitud de 115°28'04"O con altura sobre el nivel del mar de 04 m, cuenta con un clima tipo BW (h') hs (x') catalogado como cálido seco muy árido (García, 2004), por lo que, una de las principales características que se debe buscar en el muro vivo es la conservación de humedad por mayor tiempo, es decir, que el sustrato se mantenga hidratado constantemente.

Por lo anterior, se eligió el muro vivo continuo, con la siguiente configuración: un marco de estructura metálica de PTR 0.0508 x 0.0254 m (2"x1") Cal. 14 la cual mide 1.00 x 2.00 m, para fijarla se anclaron unos tubos al costado del muro para mover a diferentes distancias el muro vivo, con un máximo de 1.00 m, para así evaluar distintos espesores en la cámara de aire (figura 7); dos geotextiles, de 1 m² con 36 bolsillos cada uno para la colocación del resto de los elementos (figura 8); sustrato compuesto por 70% de musgo esfagno canadiense, 20% perlita, 5% composta y 5% humus de lombriz; la vegetación adaptada se seleccionó medicinal, de huerto y florales (figura 9, tabla 1 y 2) y por último, un sistema de riego por goteo, en donde se colocaron 36 goteros en cada metro cuadrado (cada geomembrana) 72 goteros en total, conectados por poliducto de 0.0127 m (1/2") y de 0.01905 m 3/4" que iban hacia la toma más cercana de agua potable, alimentada por tubería de PVC 0.0127 m (1/2"), éstas funcionaban con válvulas selenoide y un reloj programador

para los riegos durante el día (figura 10) los cuales se programaron para activarse de manera automática seis veces al día (tabla 3).

Figura 7.
Estructura metálica



Figura 8.
Geotextil



Figura 9.

Vegetación A, vegetación B, vegetación C



Tabla 1.

Vegetación en muro vivo

Vegetación en muro vivo (periodo cálido)			
Nombre	Vegetación A	Vegetación B	Vegetación C
Fila 1	Tomate	Tomate	Tomate y teresita
Fila 2	Lechuga y petunias	Hierbabuena	Hierbabuena
Fila 3	Tomate	Tomate	Tomate y teresita
Fila 4	Apio	Apio	Cissus y amorcito
Fila 5	Lechuga	Lechuga y eneldo	Guedelia y teresita
Fila 6	Petunias y fresa	Teresitas y fresa	Teresitas y fresa
Fila 7	Orégano	Orégano	Orégano
Fila 8	Apio	Apio	Apio
Fila 9	Teresita	Teresita	Teresita
Fila 10	Lechuga	Lechuga y lavanda	Amorcito y teresita
Fila 11	Petunias y teresitas	Teresita y lavanda con manzanilla	Teresita
Fila 12	Chile	Chile	Apio

Tabla 2.*Nombre común y científico*

Nombre de vegetación en muro vivo	
Común	Científico
Tomate	<i>Solanum lycopersicum</i>
Teresita	<i>Catharantus roseus</i>
Lechuga	<i>Lactuca sativa</i>
Hierbabuena	<i>Menta spicata</i>
Petunia	<i>Calibrachoa parviflora</i>
Apio	<i>Apium graveolens</i>
Eneldo	<i>Anethum graveolens</i>
Fresa	<i>Fragaria</i>
Orégano	<i>Origanum vulgare</i>
Cissus	<i>Cissus sicyoides L.</i>
Lavanda	<i>Lavandula angustifolia</i>
Manzanilla	<i>Chamaemelum nobile</i>
Chile	<i>Capsicum annum</i>
Amorcito	<i>Portulaca pilosa L.</i>
Wedelia	<i>Sphagneticola calendulacea</i>

Figura 10.*Toma de agua potable, válvulas y reloj*



Tabla 3.

Programación de sistema de riego

Cantidad	Horario		Duración
	ME1	ME2	
1	5:04	5:00	4 minutos
2	10:04	10:00	
3	12:04	12:00	
4	14:04	14:00	
5	16:04	16:00	
6	17:04	17:00	

3.2.2. Criterios de selección para la configuración del muro vivo

Por lo anterior, el muro vivo que se seleccionó fue el que uno de sus elementos es el geotextil, esto con el objetivo de conservar por mayor tiempo humedad en el medio de crecimiento de la vegetación. Posteriormente, se optó por implementar la técnica de muro vivo en unos muros que fueran cortos pero altos, tal y como se expresa en la sección 3.2.1 *Configuración del muro vivo seleccionado*, para así poder observar la factibilidad de integrarlos a una altura real de una vivienda, pues el mantenimiento también depende de la altura de este.

Por otro lado, para el caso de la estructura se eligió una metálica, ya que con éste material se obtiene mayor soporte para cargar el tanto el sustrato como la vegetación y geotextil húmedo, además, se diseñaron e instalaron placas al costado del muro para poder mover la estructura a diferentes distancias y así obtener distintos espesores en la cámara de aire, la separación entre el muro de bloque de concreto y el muro vivo se estableció de acuerdo a la bibliografía analizada en el *Estado del Arte*, pues allí los autores mencionan



que las cámaras de aire con mayor beneficio térmico son de: 0.05 m, 0.08 m, 0.10 m, 0.15 m, 0.20 m y 1.00 m, por tal motivo con esas distancias se realizaron las mediciones.

Asimismo, se realizó una evaluación en donde se pudiera apreciar si la integración vegetación adaptada es más efectiva o es el sustrato húmedo, todo en cuestiones térmicas y de durabilidad para el clima de Mexicali. Mientras que para el sustrato se incluyeron elementos que se mencionaron en el punto *3.2.1 Configuración del muro vivo seleccionado*, además, se utilizaron fertilizantes en el sustrato durante todo el periodo.

3.2.3. Módulos experimentales: de referencia y con técnica

Como se ha comentado anteriormente, se construyeron tres módulos experimentales orientados hacia el sur, de los cuales uno de ellos se utilizó como referencia (MR), mientras que en los otros dos se instalaron los muros vivos, en un módulo (ME1) se colocó el sustrato y en el otro módulo (ME2) fue la vegetación adaptada mencionada en el apartado *3.2.1 Configuración del muro vivo seleccionado* (figura 11). Además, en el MR, ME1 Y ME2 (tabla 4) se colocaron placas de poliestireno expandido de 0.0508 m (2”) en la parte posterior del muro de bloque de concreto, esto a manera de recubrimiento y de aislar cualquier otro factor que pueda influir en determinar el impacto térmico del muro vivo en el de block de concreto.

Figura 11.

Módulos experimentales MR, ME1 y ME2



Tabla 4.

Módulos experimentales

Nombre	Nomenclatura	Descripción
Módulo Referencia	MR	Muro de block de concreto de 0.15 m cubierto en parte posterior de poliestireno expandido de 0.0508 m (2")
Módulos con técnica		
Módulo experimental 1	ME1	Muro de block de concreto de 0.15 m cubierto en parte posterior (norte) de poliestireno expandido de 0.0508 m (2"). Cara frontal (sur) con geomembrana, sustrato y sistema de riego.
Módulo experimental 2	ME2	Muro de block de concreto de 0.15 m cubierto en parte posterior (norte) de poliestireno expandido de 0.0508 m (2"). Cara frontal (sur) con muro vivo de vegetación adaptada.



3.3 Condiciones de la evaluación IN SITU

El inicio de las evaluaciones IN SITU de los módulos experimentales se dio cuando aún no estaba instalado ningún elemento de los muros vivos en ellos, es decir, únicamente era el firme, el muro de bloque de concreto y las placas de poliestireno expandido en los tres módulos (figura 12), pues el propósito fue medir las condiciones térmicas de los mismos sin el efecto de técnica y una vez, con los datos obtenidos, poder contar con una ecuación de corrección que permitiera establecer las mismas condiciones en los tres módulos con los futuros resultados de los períodos de monitoreo, a este proceso se le conoce como la calibración de módulos.

Así pues, para llevar a cabo las mediciones térmicas en los módulos experimentales, durante el período cálido se establecieron seis escenarios (A-F) de monitoreo, en los que se evaluaron con diferentes espesores en la cámara de aire en el ME1 y ME2, esto en dos períodos de evaluación, en donde en la primera semana se analizaron los módulos antes mencionados y la otra semana se colocó en el MR un marco de madera con la misma geomembrana utilizada en el ME1 y ME2 para sombreado (figura 13), con objetivo de determinar si efectivamente la vegetación brinda mejores condiciones térmicas, si lo hace la humedad de la geomembrana o bien, el sombreado.

Para esta toma de datos se estableció que se iban a recolectar mediciones durante dos semanas y se iba a destinar una semana para el vaciado de datos y mantenimiento necesario de los módulos y equipos de medición, así pues, el período de monitoreo dio inicio en mayo de 2023 y concluyó en septiembre de 2023 (tabla 5).

Figura 12.
Módulos experimentales para calibración



Figura 13.
Muro referencia sombreado





Tabla 5.

Períodos de monitoreo

Escenario	A	B	C	D	E	F
Período 1	24 ago – 30 ago	24 jul – 30 jul	26 may – 01 jun	13 jun – 19 jun	03 jul – 09 jul	13 sept – 19 sept
Período 2	01 sept – 07 sept	02 ago – 08 ago	03 jun – 09 jun	20 jun – 26 jun	10 jul – 16 jul	20 sept – 26 sept
Espesor cámara de aire	0.05 m	0.08 m	0.10 m	0.15 m	0.20 m	1.00 m

Como se puede apreciar en la tabla 5, el orden de evaluación de los diferentes escenarios de monitoreo no corresponde con el espesor en la cámara de aire y los meses de estudio, esto debido a inconvenientes técnicos tanto de equipos de medición, de sistema de riego y de las estructura de perfil metálico del ME1 y ME2.

3.3.1 Equipos e instrumentos de medición

Para la recolección de los datos de las variables de estudio mencionadas anteriormente, se utilizaron equipos e instrumentos estandarizados específicos para las evaluaciones de campo, estos fueron:

- a) Sensores de temperatura de bulbo seco y humedad relativa, modelo RC-51H data logger de la marca Elitech (figura 14). Estos se ubicaron al interior de los módulos experimentales de acuerdo con lo establecido por la norma ANSI/ASHRAE 55-2013 (American National Standards Institute and ASHRAE Standards [ANSI-ASHRAE], 2013), pues fueron colocados al centro volumétrico del espacio.



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de las Américas

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

- b) Sensores de temperatura superficial modelo RC-5+TE data logger de la marca Elitech (figura 15), ubicados al centro geométrico del espacio (muro de bloque de concreto), tal y como se especifica en la norma ASTM C1046-95 (American Society for Testing and Material, 2007), además, para su protección se colocaron dentro de escudos solares, mientras que el termopar fue adherido al muro con pasta térmica de la marca Steren y, en algunos casos, con una pieza de poliestireno expandido EPS, esto con el objetivo de evitar el sobre calentamiento en el sensor, evitar ganancias directas debido al material de aluminio, contar con las misma condiciones de sombreado que tuvieron los tres módulos experimentales y, sobre todo, aislar los resultados obtenidos del muro de bloque de concreto.
- c) Estación meteorológica, localizada en la cubierta del instituto de ingeniería a 40 m de distancia de los módulos experimentales, de modelo *Vantage Pro2* marca *Davis* (figura 16). Esta fue utilizada para el monitoreo de las variables de control mencionadas anteriormente entre otras como velocidad y dirección de viento; punto de rocío, precipitación, radiación solar, etc. El equipo está programado para registrar datos a cada 05 minutos, sin embargo, los datos que se utilizaron fueron a cada media hora durante los periodos de monitoreo.



Figura 14.

a) Sensor TBS y HR



Nota. Adaptado de Elitech RC-51H: sensor de temperatura y humedad relativa

[Fotografía], por Elitech ®, 2023, <https://www.elitechus.com/products/elitech-rc-51h-usb-temperature-and-humidity-data-logger-pen-styled-auto-pdf-temperature-record-32000-points>. Obra de Dominio Público.

Figura 15.

b) Sensor de temperatura superficial





FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de las Fuerzas Armadas

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

Nota. Adaptado de *Elitech RC-5+TE: sensor de temperatura superficial*[Fotografía], por Elitech ®, 2023, <https://www.elitechus.com/collections/all-data-loggers/products/elitech-rc-5-pdf-usb-temperature-data-logger-reusable-recorder-32000-points-high-accuracy-extra-external-sensor>. Obra de Dominio Público.

Figura 16.

c) Estación meteorológica



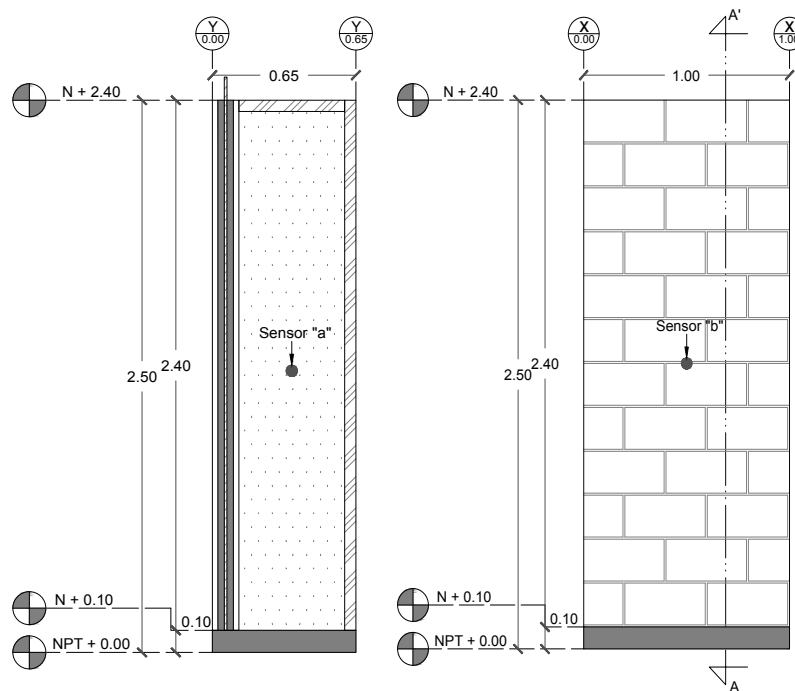
Nota. Adaptado de *Estación meteorológica Vantage Pro2 6153* [Fotografía], por Weather Controls S.A.S., 2023, <https://technometrik.com/index.php/estaci%C3%B3n-meteorol%C3%B3gica-vantage-pro2-con-protector-de-radiaci%C3%B3n-standard-detail.html>. Obra de Dominio Público.

Por otro lado, la colocación de los equipos de medición se llevó a cabo de acuerdo con las normativas correspondientes mencionadas en cada caso, centro volumétrico del

espacio habitable para los sensores “a” de TBS y HR y centro geométrico del espacio para los sensores “b” de temperatura superficial (figura 17). Para poder ubicar los sensores al interior se realizó un corte al centro de la hoja de poliestireno expandido de la cara posterior de los módulos, aproximadamente de 0.30 x 0.20 m de ancho, mientras que para los de temperatura superficial (sensores “b”) únicamente se retiraba a una distancia mínima de 0.20 m la estructura para poder adherir adecuadamente cada sensor, por otra parte, los escudos solares que resguardaron entre el espacio de 0.40 m entre cada módulo experimental.

Figura 17.

Colocación de sensores





3.3.2 Condiciones de la evaluación económica

Para llevar a cabo la evaluación económica de la implementación de un muro vivo en viviendas de construcción en serie, se empleó el método del Valor Presente Neto (VPN) en el análisis para evaluar la viabilidad del proyecto. Este enfoque permite tomar decisiones pues considera tanto los ingresos como los egresos futuros, y los resultados se expresan en la moneda actual (Baca, n.d.). Por otra parte, para calcular el VPN se requiere utilizar el Flujo Neto de Efectivo (FNE), que representa la ganancia neta después de impuestos en un año determinado. Así pues, la fórmula utilizada fue la siguiente:

$$VPN = -P + \frac{FNE}{1+i^n} + \frac{FNE}{1+i^n} + \dots \quad [1]$$

En donde P corresponde a la inversión inicial, FNE al flujo neto de efectivo del año n (ganancia neta después de los impuestos del año) e i es la tasa de inflación anual (Baca, 2013).

Por lo anterior, para la investigación se consideraron los datos de la tabla 6 de costo total por m^2 de la inversión inicial de la implementación de un muro vivo continuo que realizaría el usuario; el mantenimiento menor (cada seis meses) y mayor (siete años); la tasa de inflación anual, considerada con el 4.64% por el Índice Nacional de Precios al Consumidor (INEGI, 2023) y por último, el costo de consumo energético, en este caso para obtener el dato se hizo uso de la fórmula de transferencia de calor y del programa de *TABLA GENERAL FV 5.0* (Luna, 2019), la ecuación empleada fue:



$$Q = U A (\Delta t)$$

[2]

En donde U corresponde al valor U (transmitancia térmica) del sistema constructivo de la envolvente de la edificación; A al área en m^2 que se evaluará y Δt a la diferencia de temperatura T_{as} (temperatura solar, la ambiente) menos la temperatura del termostato (la interior en este caso). Posteriormente, una vez que se obtuvo el dato de la transferencia de calor (Q) se multiplicó por el Coeficiente de Rendimiento (COP) de un aire acondicionado de eficiencia energética (SEER) 13 (tabla 7).

Tabla 6.

Datos análisis económico - muro vivo

Inversión inicial	Mantenimientos		Tasa inflación anual
	mayor	menor	
\$10,628.00	\$7,120.00	\$940.00	4.64%

Tabla 7.

Datos para estimar la transferencia de calor (Q)

Sistema constructivo	Valor U	Área	Aire Acondicionado	
			SEER	COP
Muro block de concreto de 0.12 m celda colada	2.932	1 m^2	13	3.28



Asimismo, se utilizó el método de análisis de costo-beneficio con el propósito de conocer la factibilidad de la implementación de un muro vivo continuo en las viviendas de construcción en serie, para ello se hizo uso de la siguiente fórmula:

$$\text{Relación } B/C = \frac{\text{Valor presente de los ingresos}}{\text{Valor presente de los costos}} \quad [3]$$

3.4 Procesamiento de datos

El procesamiento de los datos, primeramente, tal y como se describió en el apartado 3.3 *Condiciones de la evaluación IN SITU*, se llevó a cabo el de la calibración de los muros del 01 al 24 abril de 2023 con toma de datos a cada 30 minutos, a través de los instrumentos de evaluación de Temperatura de Bulbo Seco (TBS), Humedad Relativa (HR) y Temperatura Superficial (TS) que se mencionan en el 4.3.1 *Equipos e instrumentos de medición*. Así pues, con la información se elaboró una tabla en donde se colocó una columna para los resultados de TBS del MR, del ME1 y ME2, para posteriormente conseguir la ecuación de corrección lineal entre las variables antes mencionadas, representado también en gráficas (figura 18 y 19). El objetivo fue conocer cuál de los tres módulos experimentales se iba a utilizar de referencia, por lo que, se obtuvo que el MR sería el adecuado y que para el ME1 y ME2 se iba a emplear diferentes ecuaciones de corrección, además, se conoció la desviación estándar (σ), el error típico (SE), se presentó el número de muestras analizadas (n) y la línea de tendencia representada por R^2 (tabla 8).



Figura 18.

Ecuación corrección ME2 y R^2

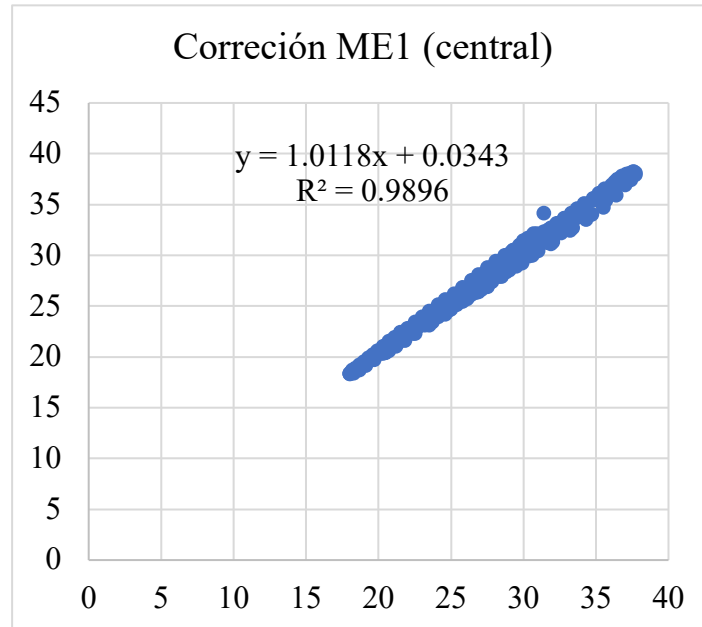


Figura 19.

Ecuación de corrección y R^2

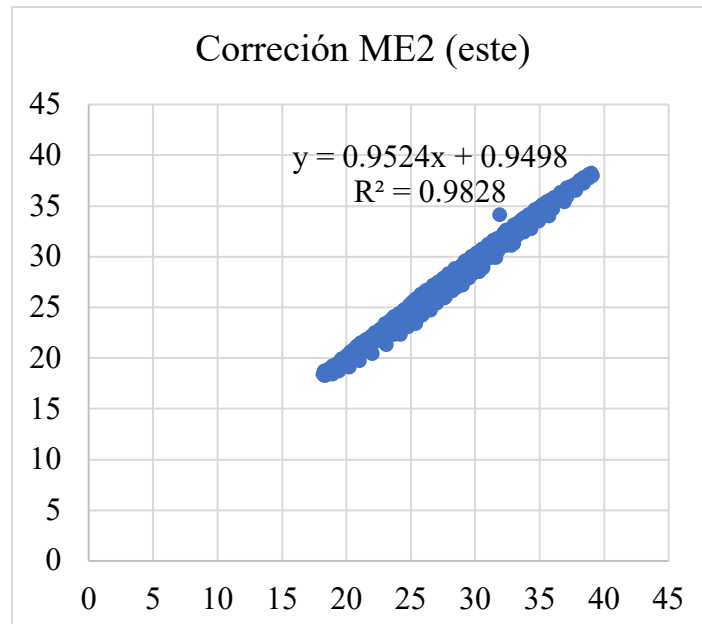




Tabla 8.

Ecuaciones de corrección de ME1 y ME2

Temperatura bulbo seco (TBS)						
Número	Referencia	R ²	Ecuación de corrección	σ	SE	n
1	ME1	0.9896	Y=1.0118x + 0.0343	4.54	0.45	671
2	ME2	0.9828	y = 0.9524x + 0.9498	4.93	0.60	671

Posteriormente, el 26 de mayo de 2023 dieron inicio las mediciones de los escenarios y de los dos períodos de monitoreo térmico que se muestran en la tabla 5. Así pues, al concluir las tomas de datos de todos los escenarios de los dos períodos, con la información obtenida se reemplazó la Temperatura de Bulbo Seco interior que arrojaron los sensores en las ecuaciones de corrección que correspondían al ME1 y ME2, para así lograr el resultado correcto de TBS interior, mientras que en el MR se consideró lo que el sensor monitoreó. Asimismo, para el análisis de la información se utilizaron las cifras de las variables de Radiación solar y TBS exterior de la estación meteorológica.

Por lo anterior, se obtuvo información acerca de la relevancia de la implementación de un muro vivo, una barrera de sustrato con sistema de riego y el sombreado, para viviendas de construcción en serie de climas áridos, como el caso de la ciudad de Mexicali, esto a través del análisis de la variables mencionadas anteriormente, para así, determinar la de mayor eficacia e impacto térmico, mismo que se verá reflejado en los resultados presentados en el siguiente capítulo.



3.4.1 Día Representativo (DR)

Por lo anterior, se estableció que sería necesario contar con un Día Representativo (DR) de la temporada cálida (mayo – octubre) de la ciudad de estudio, Mexicali, de cada escenario evaluado, por lo que, se hizo uso de la ecuación para obtener el Día Representativo, la cual tiene como objetivo realizar análisis comparativos entre variables de temperatura (Quiroa-Herrera et al., 2021), pues se determina como DR aquel que obtenga la temperatura más cercana al valor medio de la TBS en el período de evaluación y que, además, el que la diferencia de temperatura media más la de oscilación térmica se acerquen al valor cero, así pues, la fórmula utilizada fue:

$$DR = (T_{mdiaia} - T_{mtemporada}) + (OscT_{mdiaia} - OscT_{mtemporada}) \quad [4]$$

Por consiguiente, fue necesario utilizar la información del archivo meteorológico de Mexicali, de la estación localizada en el Aeropuerto Internacional de Mexicali (clave 760053), pues para determinar el DR de cada período era indispensable conocer los datos de la temperatura y oscilación térmica media de la temporada (tabla 9) mismos que usaron para elaborar la tabla 10.



Tabla 9.

Datos climatológicos de Mexicali

Temperatura	Mensual						Temporada
	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	
máxima	42.6°C	39.4°C	41.8°C	40.8°C	38.4°C	39.2°C	40.4°C
media	28.5°C	31.9°C	35.1°C	34.4°C	31.4°	25.0°C	31.0°C
mínima	14.1°C	24.0°C	28.2°C	28.0°C	24.8°C	12.4°C	21.9°C
Osc máx abs	28.5°C	19.6°C	16.9°C	15.8°C	18.0°C	26.8°C	20.9°C
Osc media	1.26°C	8.2°C	7.2°C	6.2°C	8.0°C	1.15°C	5.3°C
Osc mín abs	0.0°C	15.4°C	13.6°C	12.7°C	13.6°C	0.0°C	9.3°C

Nota. Elaborado propia a partir de *Efecto de enfriamiento evaporativo en fachada ventilada. estudio en clima cálido seco extremo* por Sotelo-Salas, 2020.

4.1.1 Relación de Diferencia de Temperaturas (TDR)

Por otra parte, la Relación de Diferencias de Temperaturas (Temperature Difference Ratio [TDR], por sus siglas en inglés) se utilizó con el propósito de poder comparar el desempeño de cada escenario evaluado, pues gracias a este método, propuesto por Givoni y La Roche en el 2002, se puede realizar la comparativa de diferentes casos aun cuando se hayan presentado distintas condiciones meteorológicas entre los períodos y escenarios de monitoreo térmico (Basunbul y Braham, 2023). Así pues, esto se puede calcular con la siguiente fórmula:



$$TDR = \frac{T_{maxout} - T_{maxin}}{T_{maxout} - T_{minout}} \quad [5]$$

En donde la temperatura máxima exterior se resta con la temperatura máxima interior (numerador); nuevamente, la temperatura máxima exterior menos la temperatura mínima exterior (denominador), lo que determina la amplitud térmica del exterior, y de la división de estos datos se obtiene el resultado del porcentaje de la eficiencia de un sistema pasivo de enfriamiento (Sotelo-Salas, 2020), por lo que, entre mayor sea el valor mejores condiciones proporcionará al interior del espacio habitable.



4. RESULTADOS

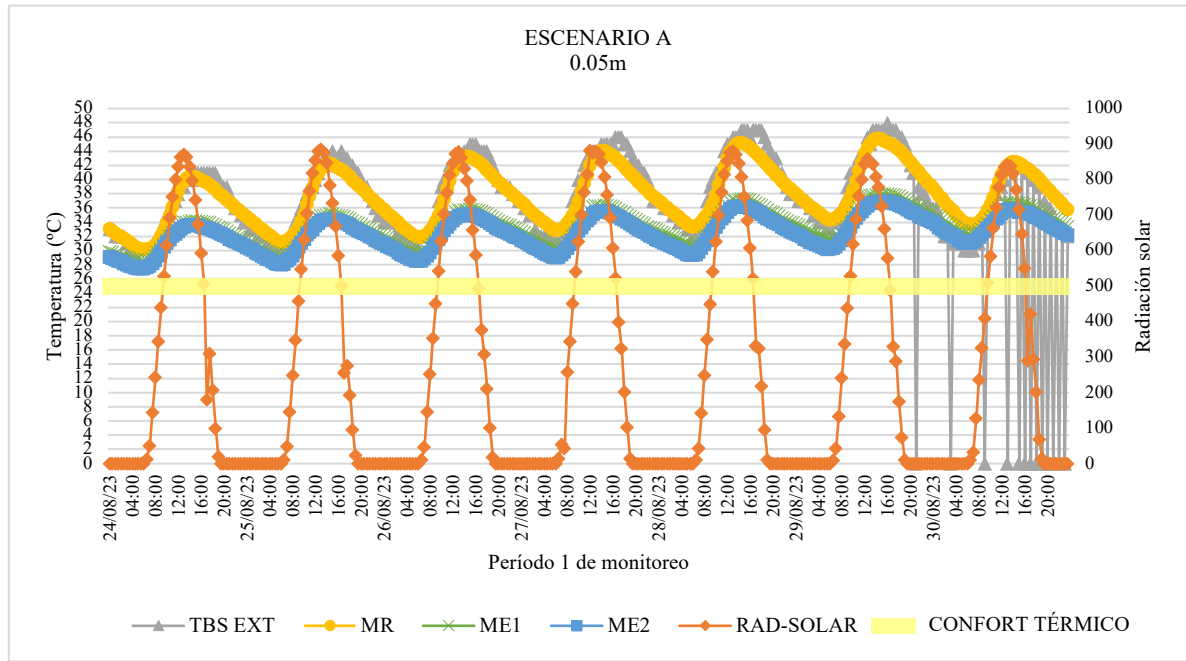
El presente capítulo corresponde a los resultados obtenidos de la evaluación térmica y económica de la implementación de la técnica de muro vivo. Asimismo, para poder tener certeza del beneficio de la incorporación de un elemento vivo en los muros de las viviendas de construcción en serie de las ciudades con climas áridos, se comparó con un muro de referencia, uno con sustrato y sistema de riego, y uno más con un elemento de sombra, de los cuales se analizaron las variables térmicas como: Temperatura de Bulbo Seco (TBS) exterior e interior; Temperatura Superficial (TS) y Radiación solar, mientras que las económicas fueron valor presente neto (VPN) y beneficio-costo, ambos en moneda mexicana. Por consiguiente, se mostrarán tablas y gráficas en donde se demuestre el efecto que tuvo cada técnica estudiada, pues se proyectará el resultado de cada escenario en ambos períodos (período 1 sin sombra y período 2 con sombra) de TBS y posteriormente, los de TS, para concluir con los de factibilidad económica.

4.1 Desempeño Térmico

4.1.1 Temperatura Bulbo Seco (TBS)

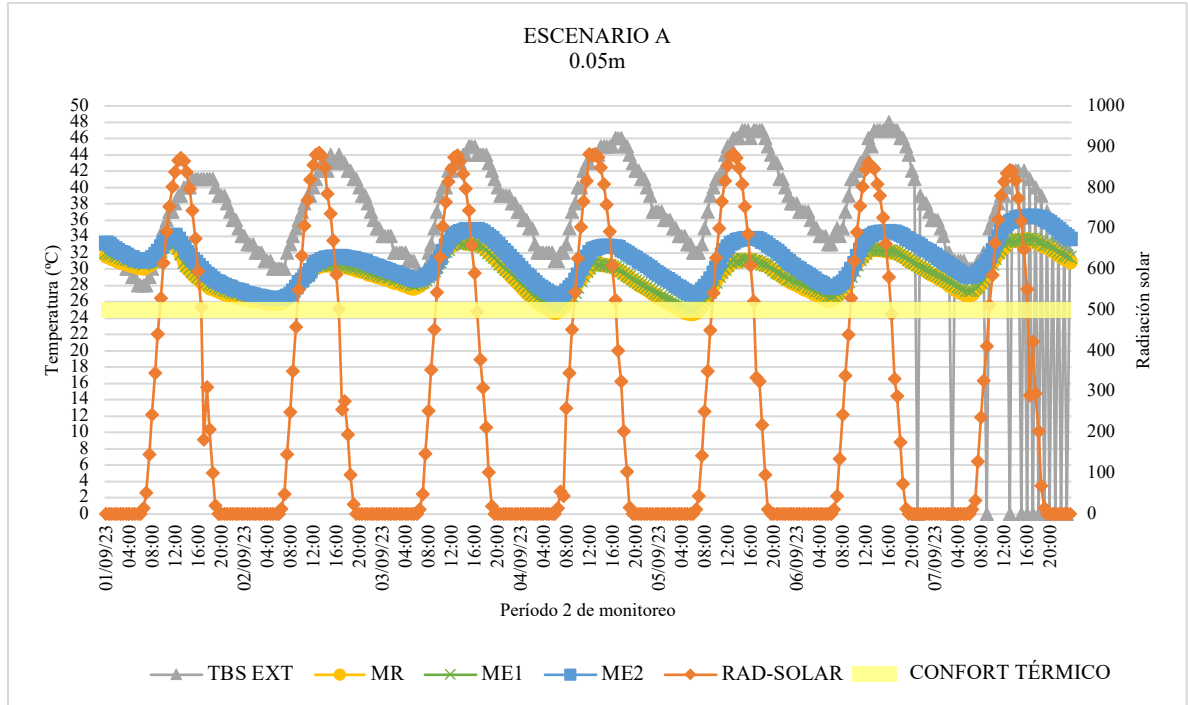
Los resultados de cada escenario se muestran en gráficas individuales, aquí se puede apreciar que el escenario A, correspondiente a la cámara de aire con espesor de 0.05 m, es caso de mayor beneficio es el muro vivo (ME2), pues respecto con el muro con sustrato y sistema de riego (ME1) presentó una diferencia de 1°C, mientras que con el muro de referencia (MR) fue de 8.8 °C (figura 20) de TBS.

Figura 20.
Escenario A - período 1 (sin sombra)



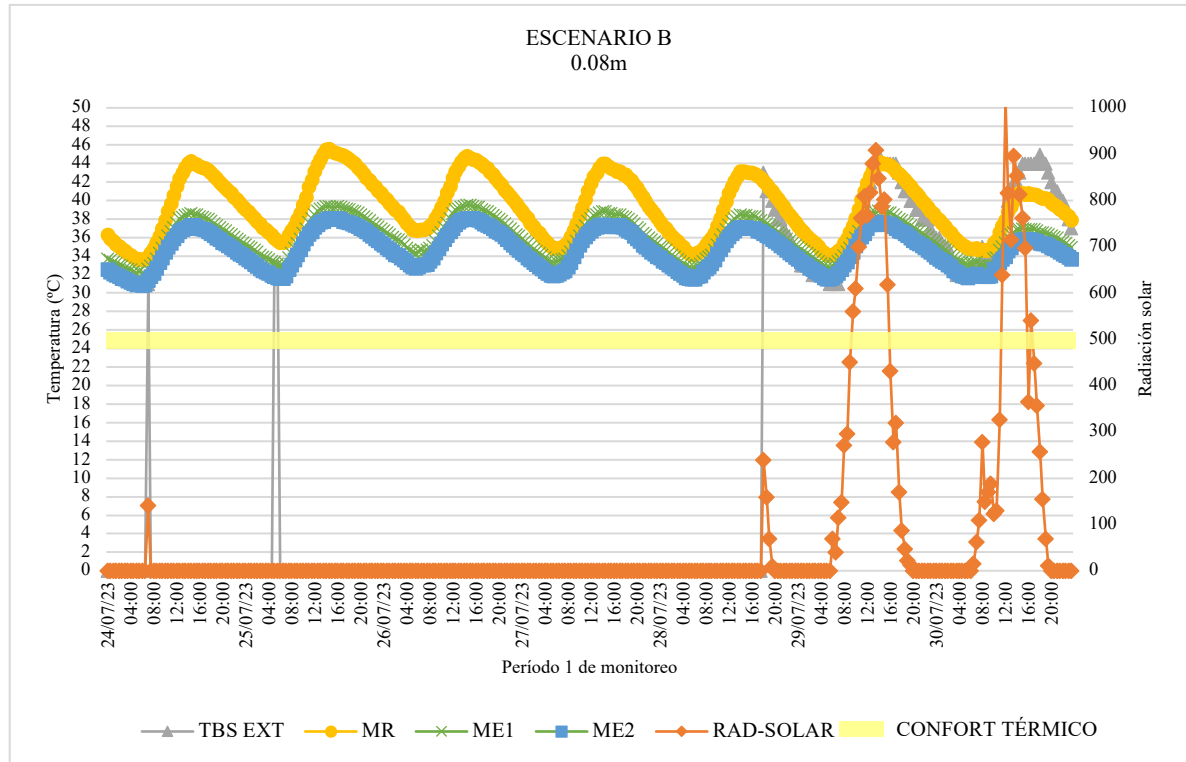
Mientras que en el caso del período 2, se presentó diferente el resultado, pues de acuerdo con los datos obtenidos, el MR sombreado brindó mejores condiciones térmicas que el ME1 y ME2, sin embargo, esto fue con diferencia de 3°C respecto al ME2, mientras que el ME1 tuvo la misma temperatura (figura 21).

Figura 21.
Escenario A - periodo 2 (con sombra)



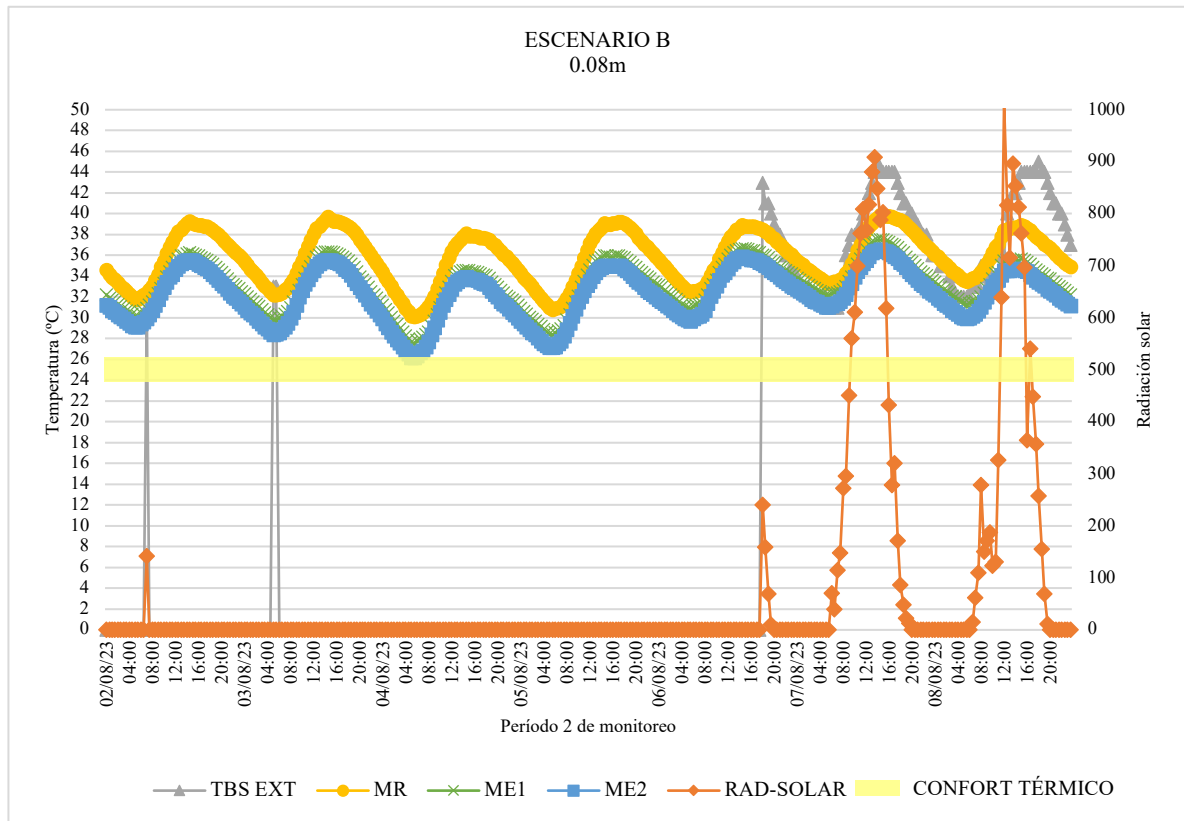
Por otro lado, en el escenario B los resultados determinaron que el ME2, al igual que con el escenario A, presentó mayor deferencia de temperatura respecto al MR, pues fueron 7.5°C de TBS máxima, mientras que con el ME1 fue de 6.1°C (figura 22). Asimismo, se observa que la radiación solar y la TBS exterior presentan ciertas inconsistencias, pues la mayoría de los datos se encuentran en cero, esto fue debido a inconvenientes con la estación meteorológica, pues así marcaron las cifras.

Figura 22.
Escenario B - período 1 (sin sombra)



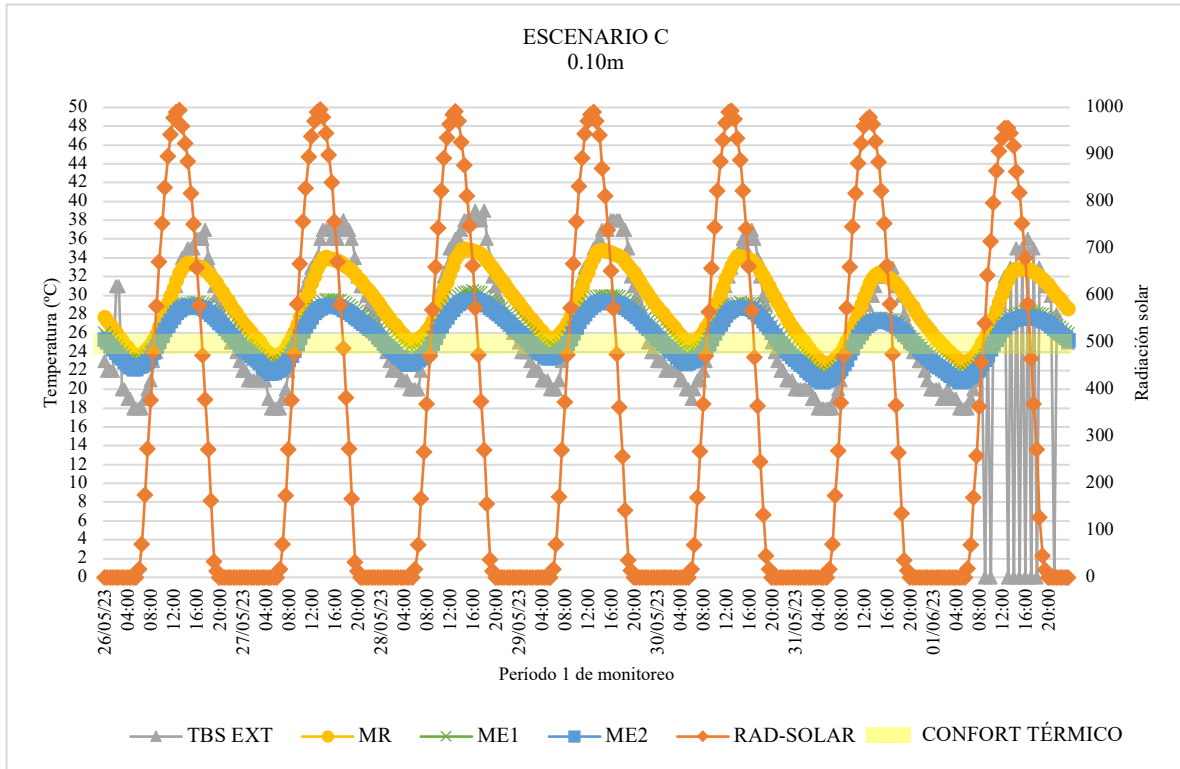
Así pues, se presenta en la siguiente gráfica (figura 23) el comportamiento del escenario B del período 2. En ella podemos observar que el ME2 también fue el de mejores condiciones térmicas, pues contó con una diferencia de TBS máxima de 3.3°C respecto al MR con sombra, mientras que el ME1 fue de 2.2°C.

Figura 23.
Escenario B - período 2 (con sombra)



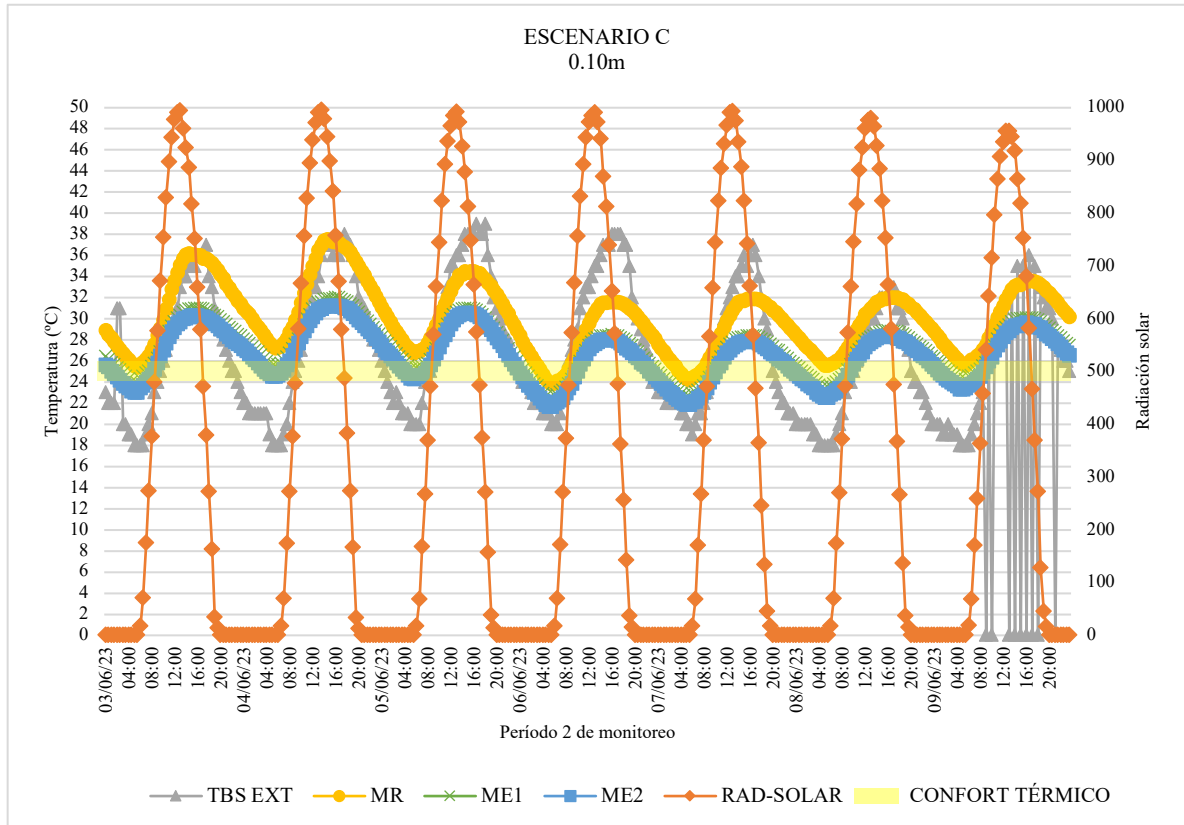
En el caso del escenario C, se presentaron las mismas condiciones, pues se obtuvo que el ME2 que reduce la TBS interior hasta 5.4°C en comparación con el MR, asimismo, el ME1 presentó reducción de temperatura con 4.5°C de diferencia, por lo que, el ME2 sigue mostrándose como el óptimo. Además, se observa que gracias a la implementación de la técnica se puede contar con condiciones confortables al interior del espacio habitable (figura 24).

Figura 24.
Escenario C - período 1 (sin sombra)



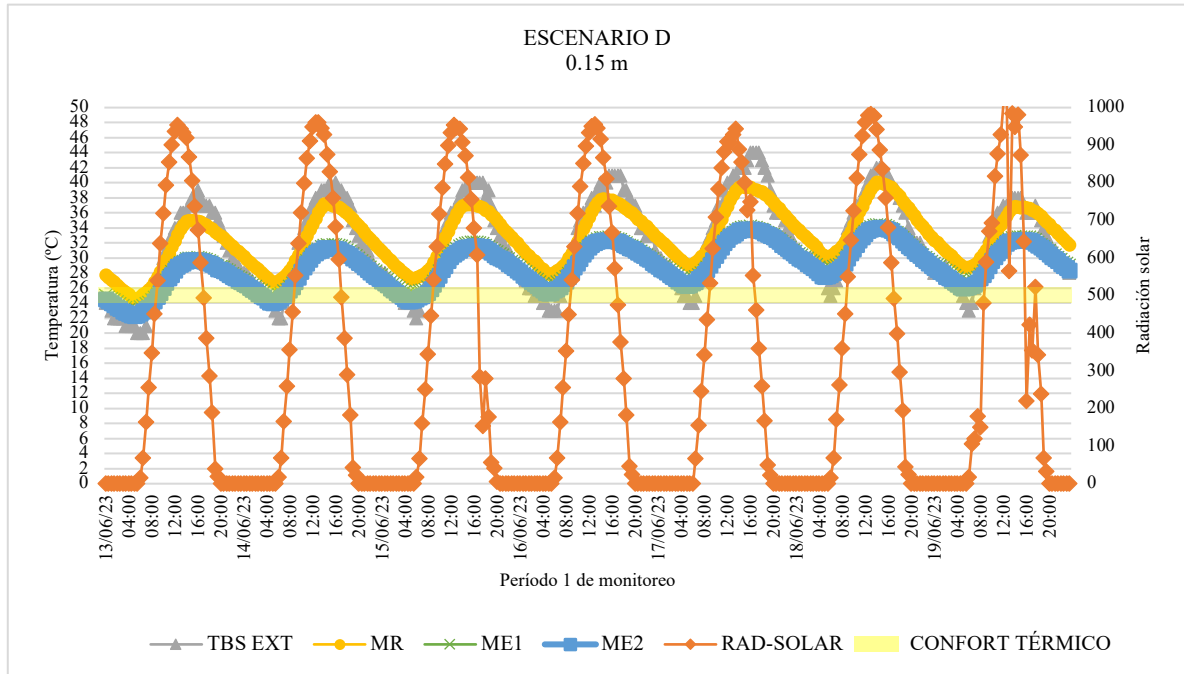
Mientras que el período 2 del escenario C, también se presentaron diferencias de TBS máxima, el ME2 con 6.3°C y el ME1 con 5.5°C, lo cual muestra el beneficio de la implementación del muro vivo, además, este caso se puede observar que se llegan a tener condiciones de temperatura confortables al interior (figura 25).

Figura 25.
Escenario C - período 2 (con sombra)



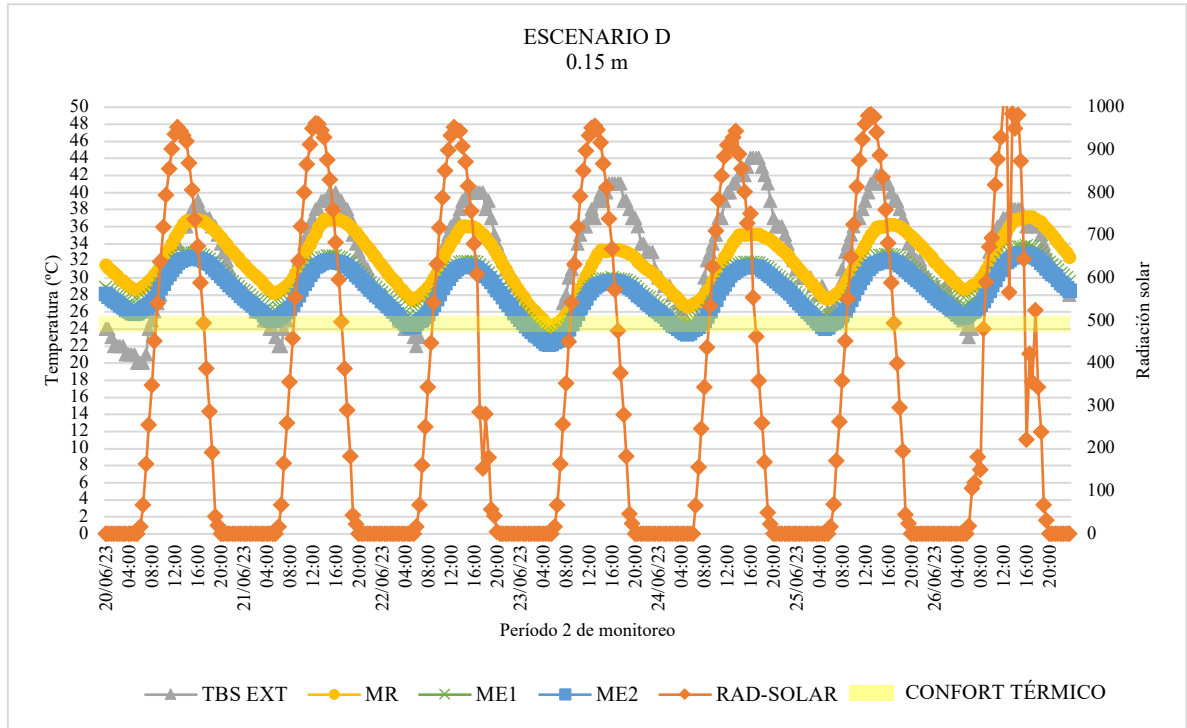
El escenario D del período 1, presentó las mismas condiciones que los anteriores, es decir, se muestra que el ME2 es el que brindó mejores condiciones de TBS interior, sin embargo, en este caso únicamente hubo una diferencia del 0.3°C respecto al ME1. Por otro lado, respecto al MR, la reducción fue de 6°C para el ME2 y de 5.7°C para el ME1, además, ambos contaron con ciertas horas en las que la temperatura al interior era de confort (figura 26).

Figura 26.
Escenario D - período 1 (sin sombra)



Por otra parte, el período 2 del escenario D mostró el mismo resultado, es decir, el ME2 como el óptimo, con 4.2°C de diferencia de TBS máxima respecto al MR, mientras que el ME1 con reducción de TBS de 3.4°C, asimismo, se presentaron ciertas horas con temperaturas de confort en ambos casos (figura 27).

Figura 27.
Escenario D - período 2 (con sombra)



Así pues, el ME2 en el escenario E del período 1 como del período 2 resultó ser el caso de mayor reducción de TBS máxima, pues en el período 1 la diferencia fue de 4.3°C (figura 28) respecto al MR y en el período 2 de 3.4°C (figura 29), mientras que el ME1 redujo 3.4°C en las evaluaciones realizadas sin sombra y 2.5°C con sombra.

Figura 28.
Escenario E - período 1 (sin sombra)

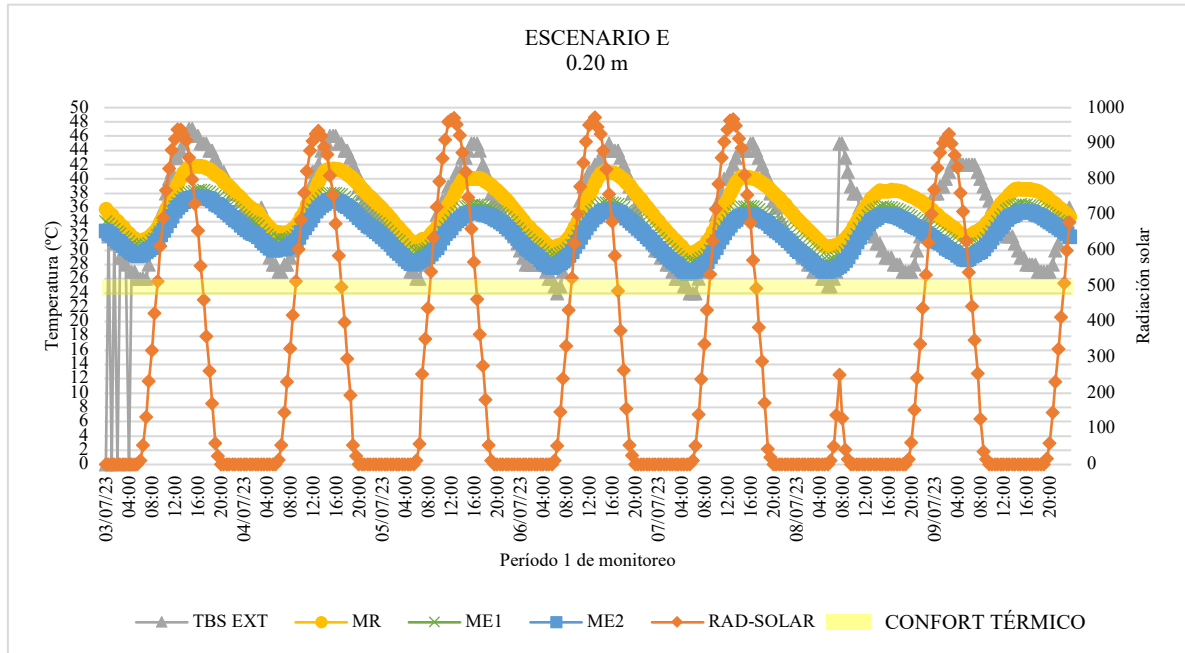
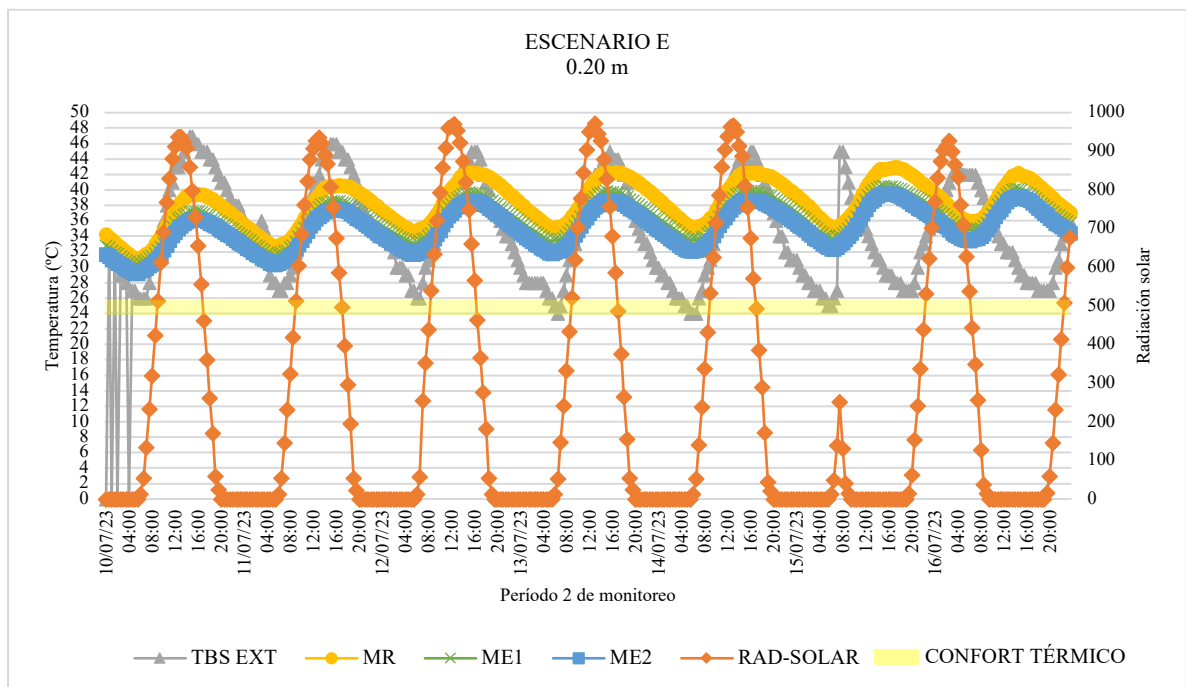
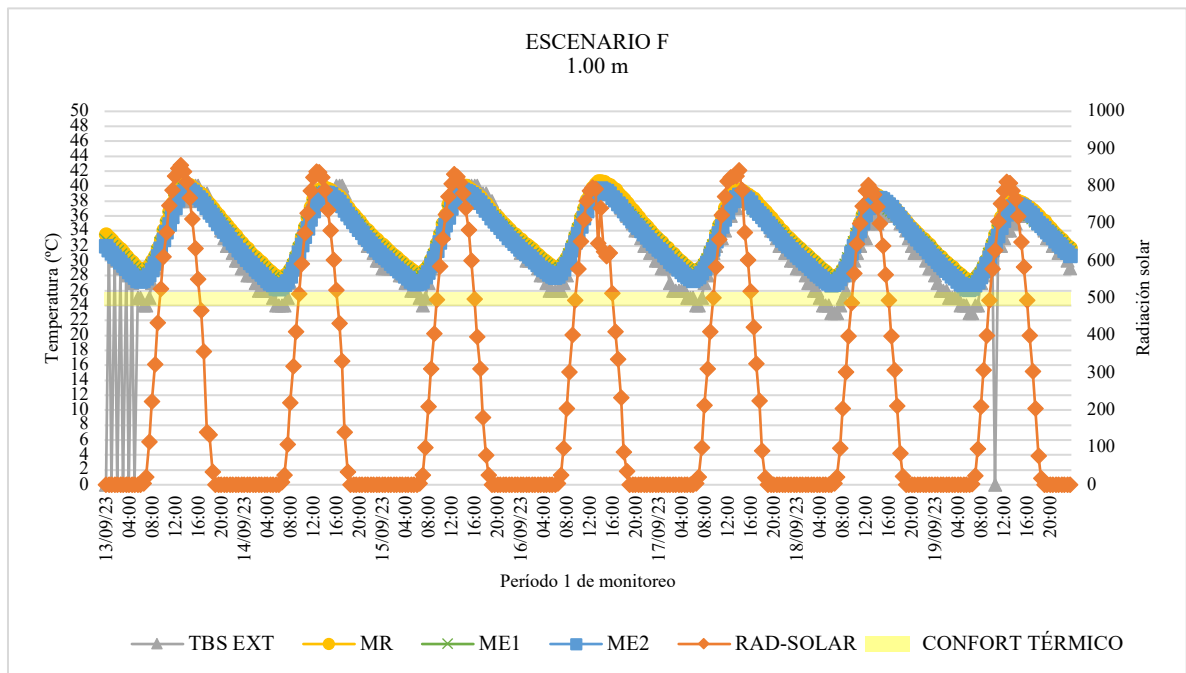


Figura 29.
Escenario E - período 2 (con sombra)



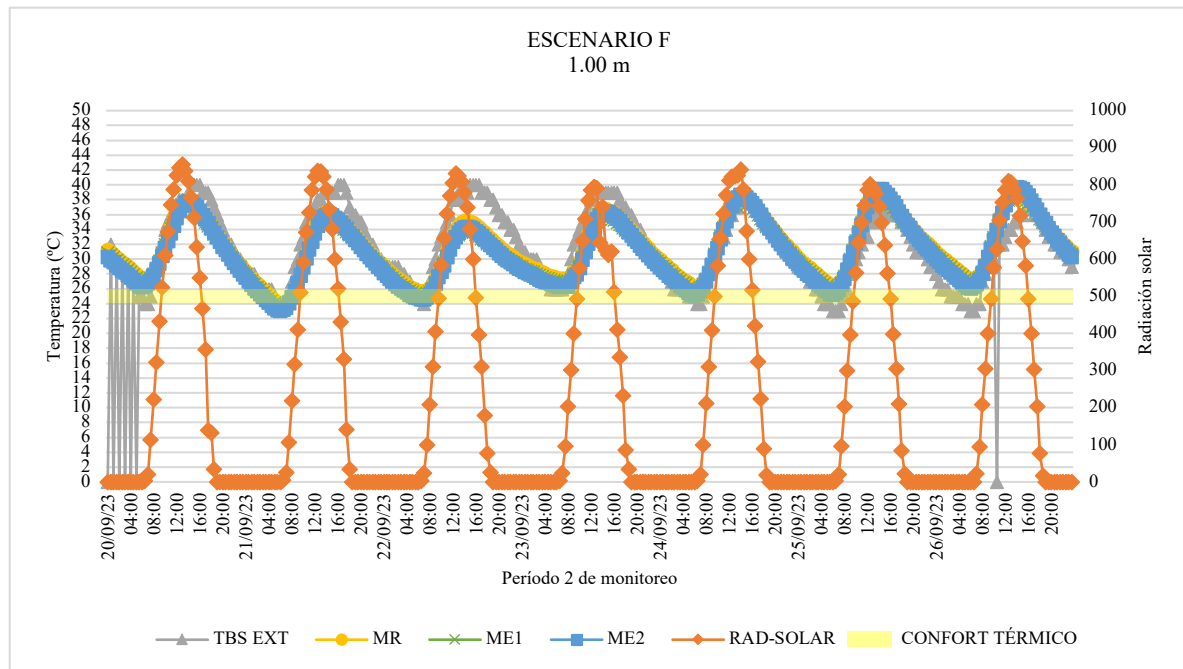
Por último, el escenario F presentó una diferencia de temperatura máxima de 1°C tanto en el ME1 como en el ME2 respecto al MR, es decir, que en cualquiera de los dos casos brinda el mismo beneficio térmico. Por otro lado, se observa que, de todos los escenarios presentados, el que no tendría reducciones considerables de temperatura sería este de 1.00 m, pues tal y como se aprecia en la figura 30, en ciertas horas del día la TBS exterior se encuentra en condiciones confortables, sin embargo, la TBS interior no lo hace.

Figura 30.
Escenario F - período 1 (sin sombra)



Por otro lado, en el período 2 del escenario F el resultado fue distinto, pues el caso de mayor beneficio fue el ME1, sin embargo, únicamente fue con una diferencia de 0.2°C respecto al MR e incluso el ME2 presentó la TBS interior máxima más alta (figura 31).

Figura 31.
Escenario F - período 2 (con sombra)



4.1.2 Temperatura Superficial (TS)

Los resultados de Temperatura Superficial (TS) presentaron condiciones contrarias a los de TBS, es decir, los casos de mayor beneficio no fueron los ME2, sin embargo, aun cuando los ME1 resultaron los más diferencia de TBS máxima, esto no fue considerable. Así pues, el escenario A en el período 1 mostró una reducción de TS de 21°C en el ME1 y 20.2°C en el ME2 (figura 32) con una temperatura ambiente promedio de 37.9°C, mientras que en el período 2 se observa que MR sombreado es el de menor beneficio térmico, pues obtuvo 9.9°C más en la TS máxima (figura 33). Por otro lado, aunque se aprecia que el ME2 obtuvo cifras de 1.5°C, esto se debió a inconsistencias de la estación meteorológica.

Figura 32.
Escenario A - período 1 (sin sombra)

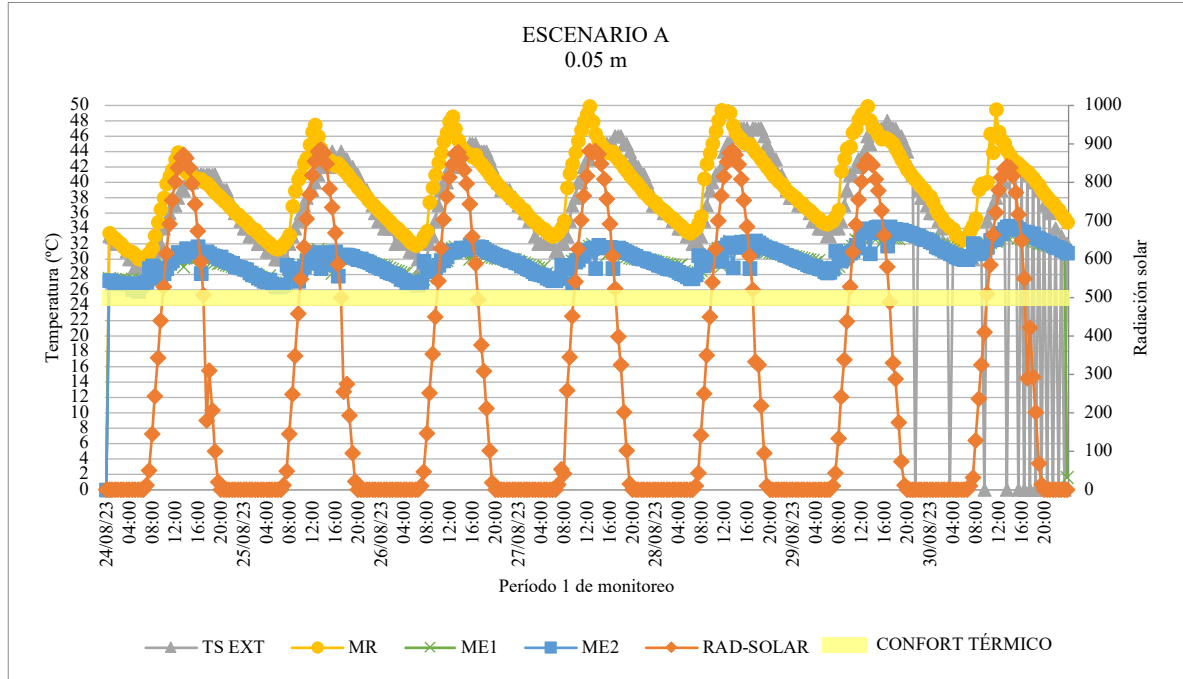
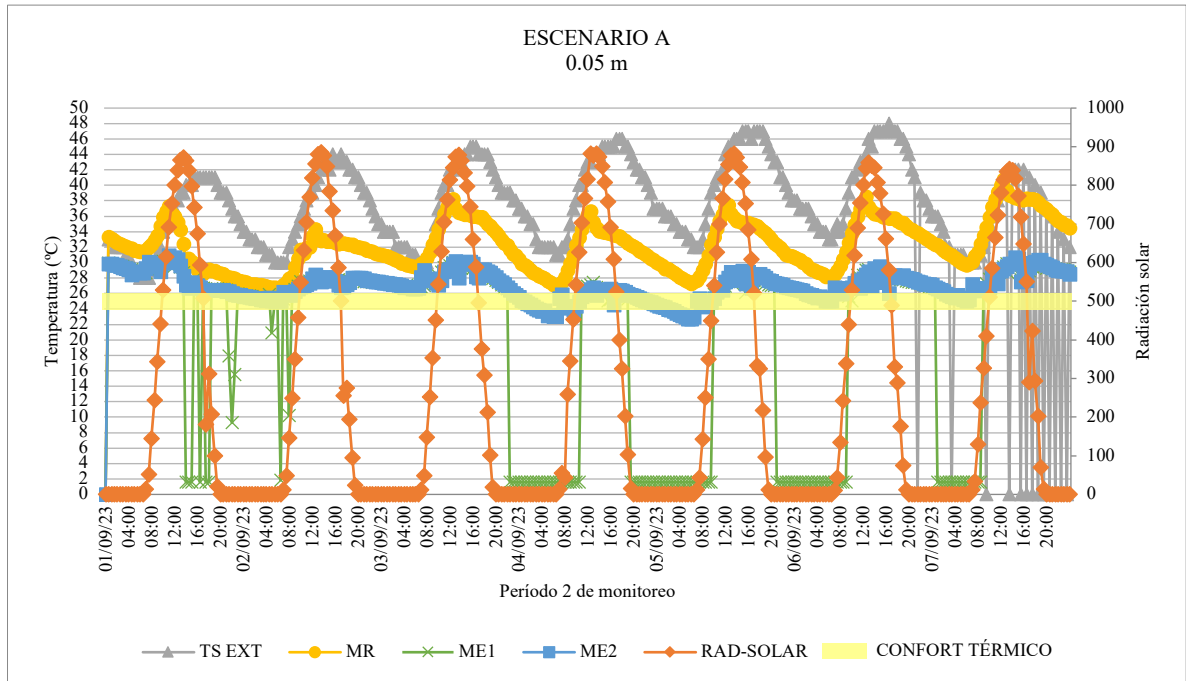


Figura 33.
Escenario A - período 2 (con sombra)



Por otro parte, el caso del escenario B presentó diferencias entre el ME1 y ME2 de 0.04°C en cuanto a TS máxima, sin embargo, se observa en la figura 34 que el MR sombreado sigue sin mostrar mejores condiciones de confort térmico respecto al ME1 y ME2, pues se obtuvo 13.2°C y 12.8°C menos, respectivamente, esto en el período 1. Mientras que el período 2, en donde el MR se sombreadó, el ME2 fue el de mayor reducción de TS máxima con 5.5°C respecto al MR y 4.7°C con el ME1 (figura 35).

Figura 34.
Escenario B - período 1 (sin sombra)

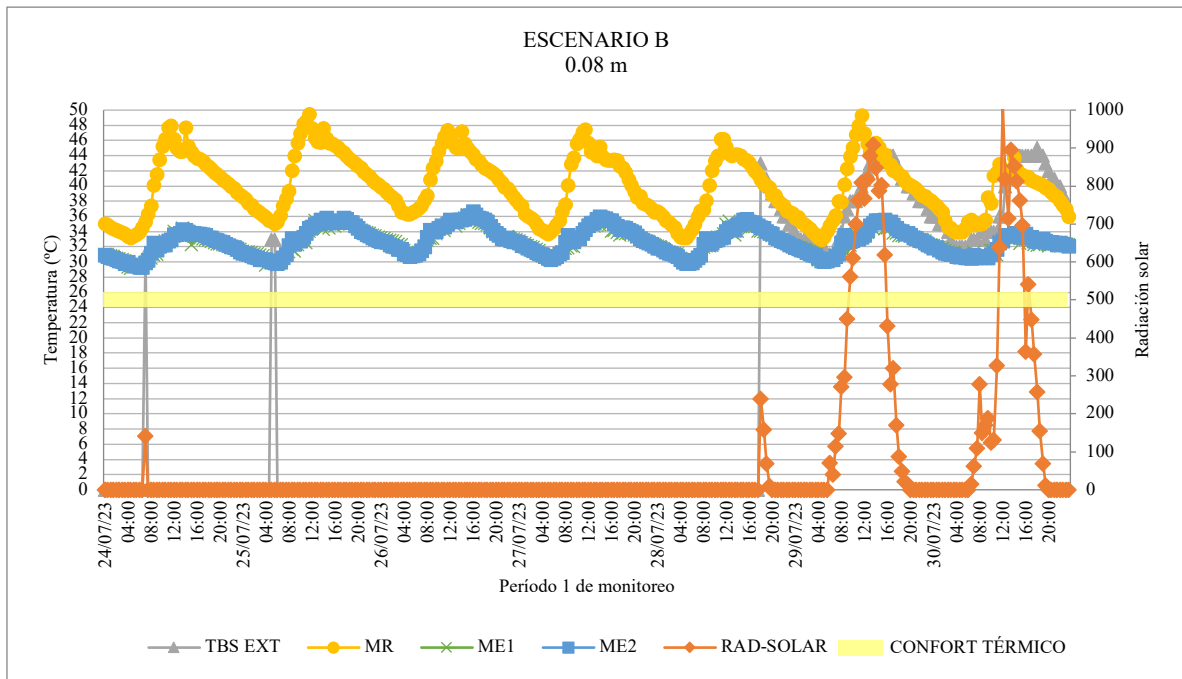
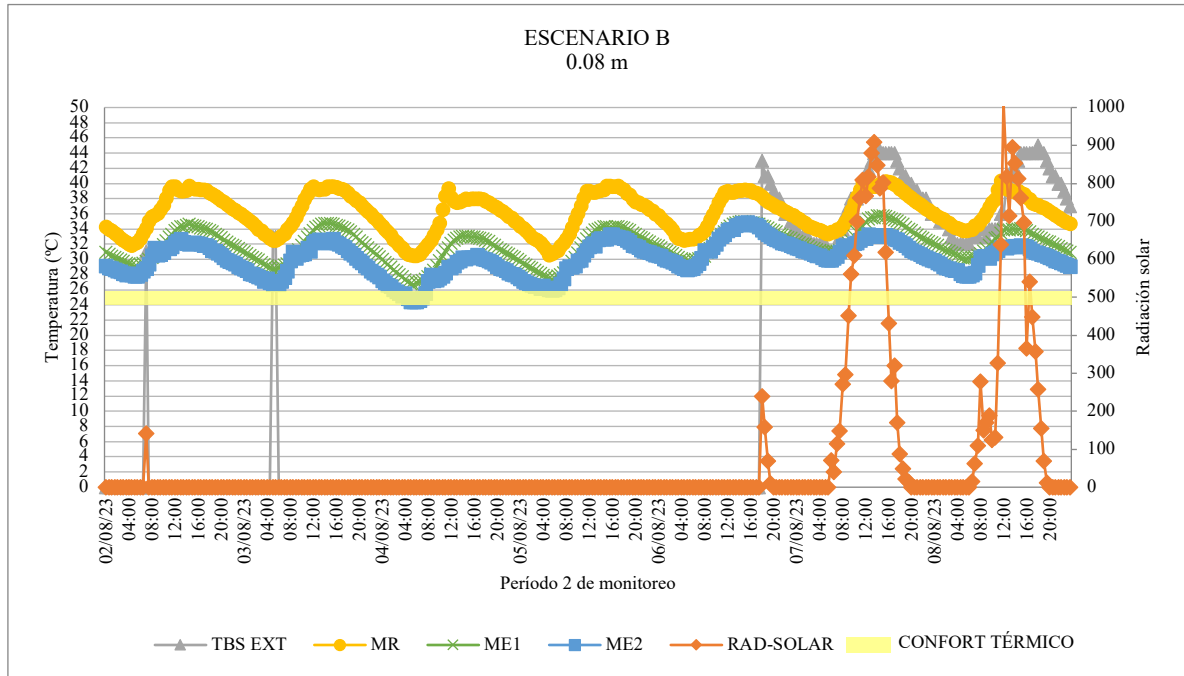


Figura 35.
Escenario B - periodo 2 (con sombra)



Así pues, se presentaron resultados en el escenario C del período 1 de 6.5°C, en el ME1, y 7.1°C, para el ME2, de reducción de TS máxima (figura 36), por lo que, en este caso el ME2 sería la opción que proporcionaría mejores condiciones térmicas. Para el período 2 la diferencia que hubo entre el ME1 y ME2 fue de 0.01°C, sin embargo, con el MR sombreado fue de 11.9°C y 11.8°C respectivamente (figura 37).

Figura 37.
Escenario C - período 1 (sin sombra)

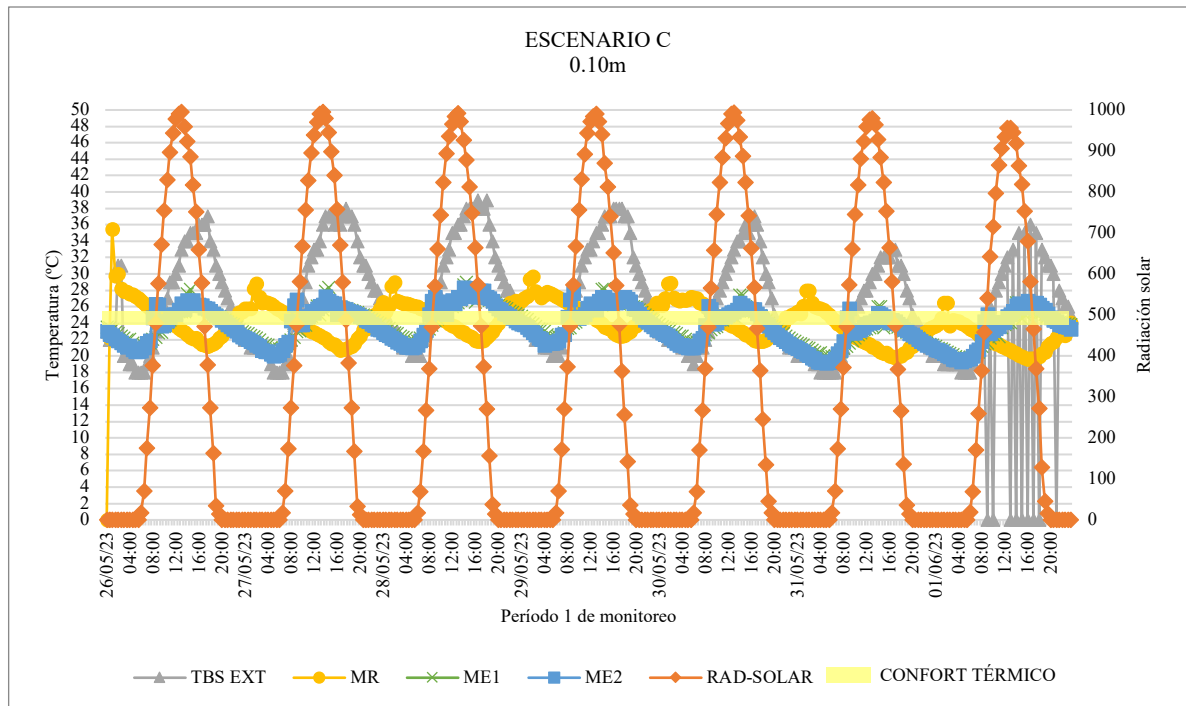
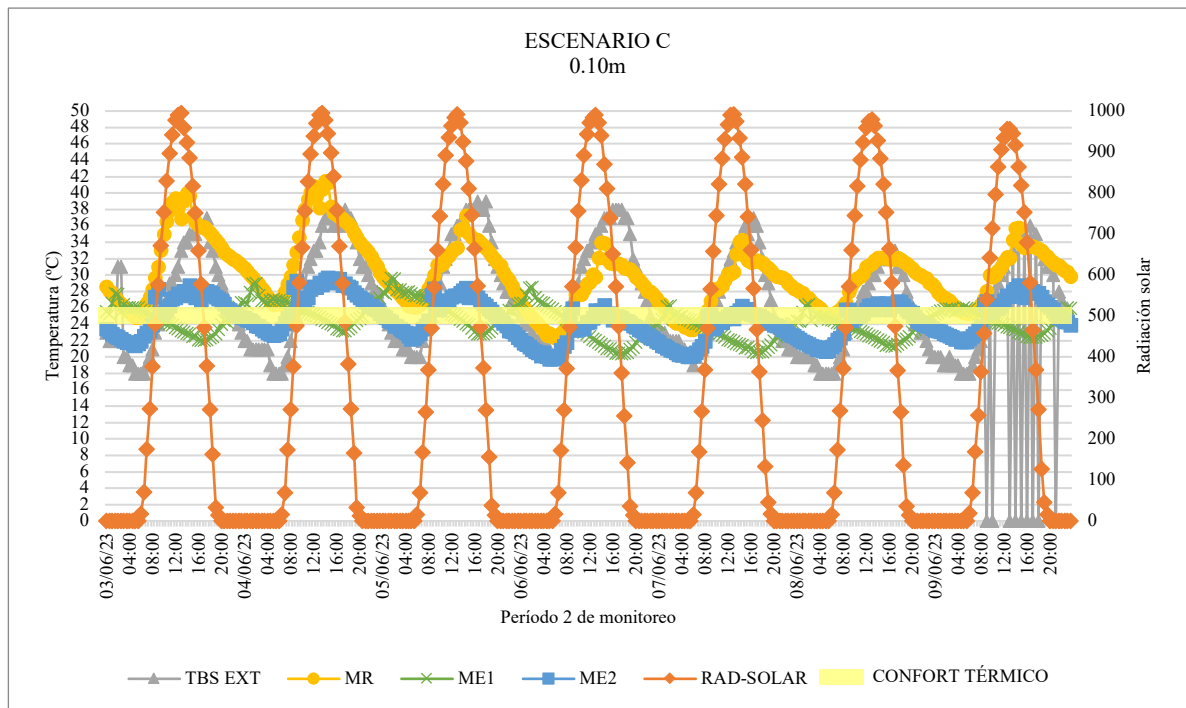


Figura 36.
Escenario C - período 2 (con sombra)



Por otra parte, en el período 1 del escenario del caso óptimo fue el ME1, pues la máxima TS que se registró fueron 33.2°C, mientras que el MR tuvo 44.2°C y el ME2 34.4°C (figura 38). Así pues, se presentaron los mismos resultados en el período 2, pues el ME1 obtuvo menor TS máxima con 31.9°C, el ME2 34.7°C y el MR sombreado 40.7°C (figura 39).

Figura 38.
Escenario D - período 1 (sin sombra)

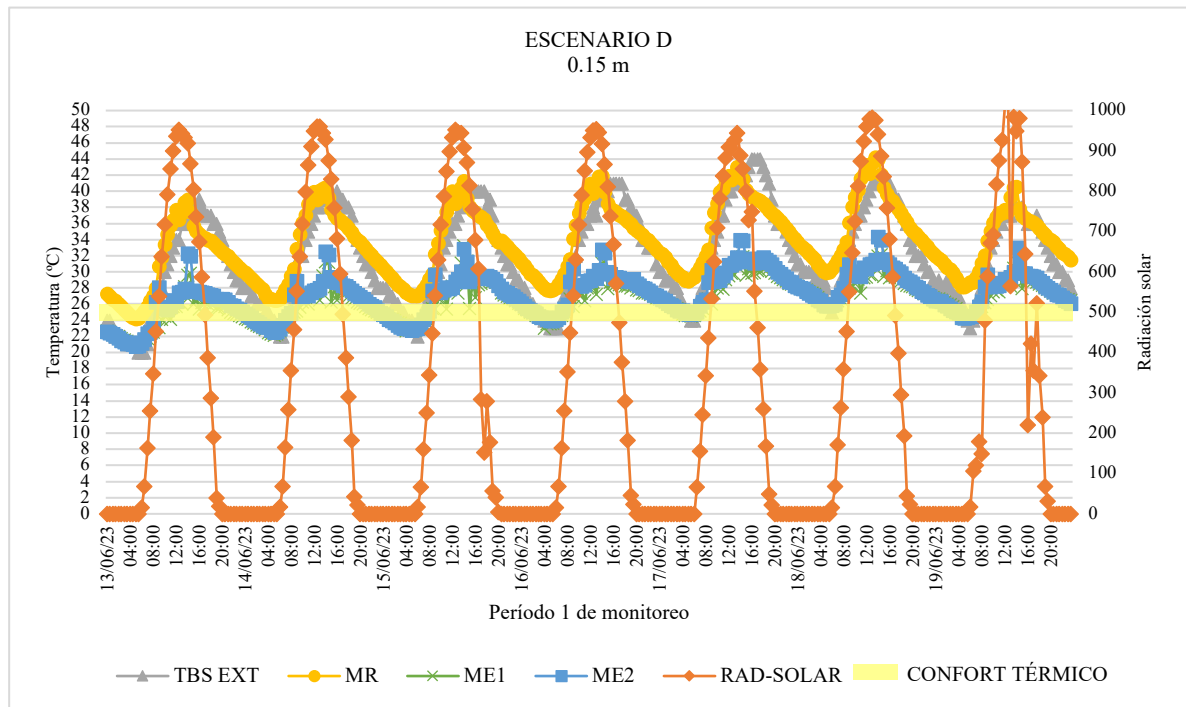
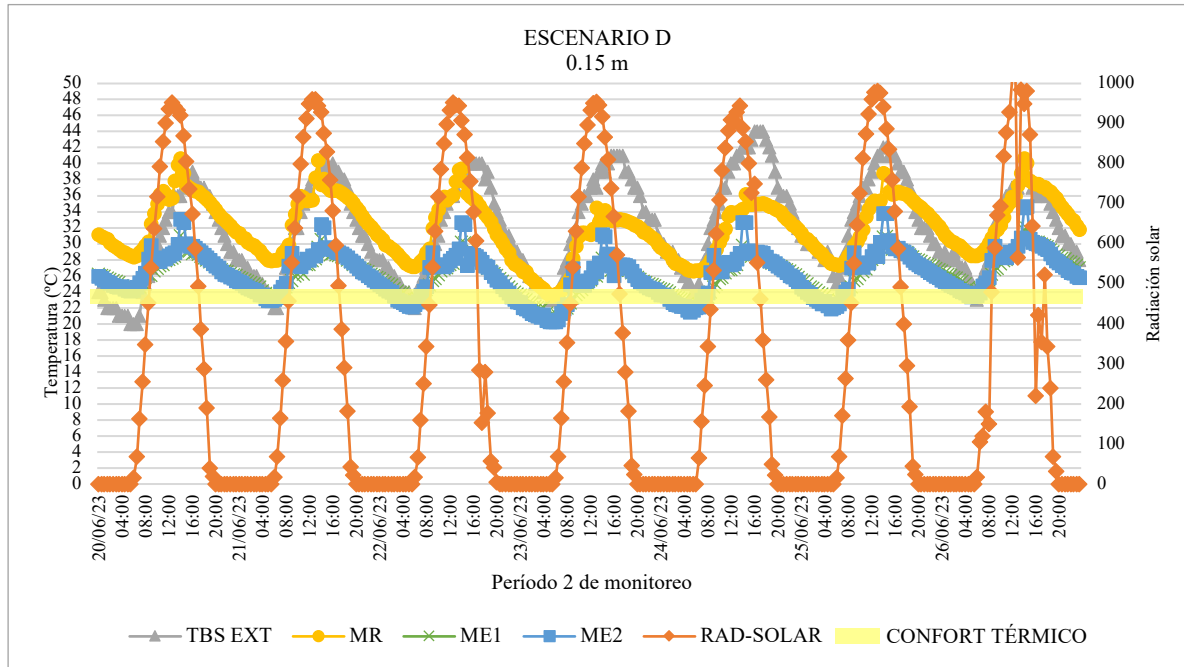


Figura 39.
Escenario D - período 2 (con sombra)



Así mismo se mostraron los resultados del escenario E del período 1, pues se observa en la figura 40 que el ME1 brinda mayor reducción de temperatura superficial con 37.7°C de TS máxima y el MR el de menor beneficio con 43.9°C. En el período 2, se presentaron las mismas condiciones, es decir, el ME1 tuvo como TS máxima 38.5°C, mientras que el de mayor TS máxima fue el MR sombreado con 43.6°C (figura 41).

Figura 41.
Escenario E - período 1 (sin sombra)

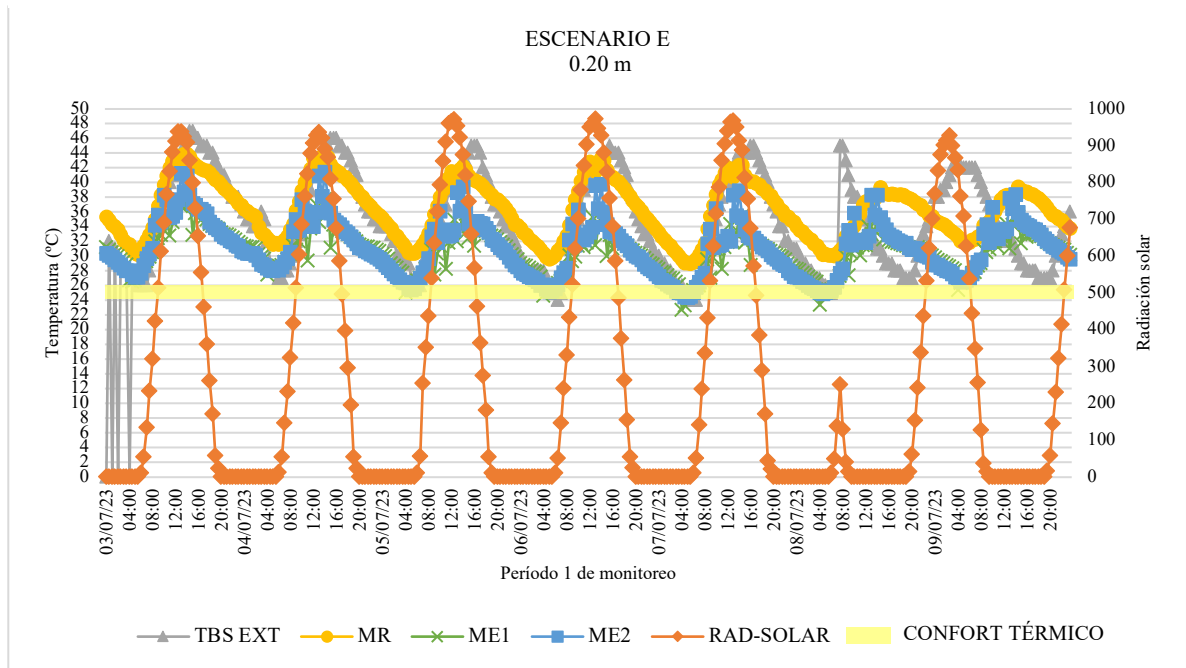
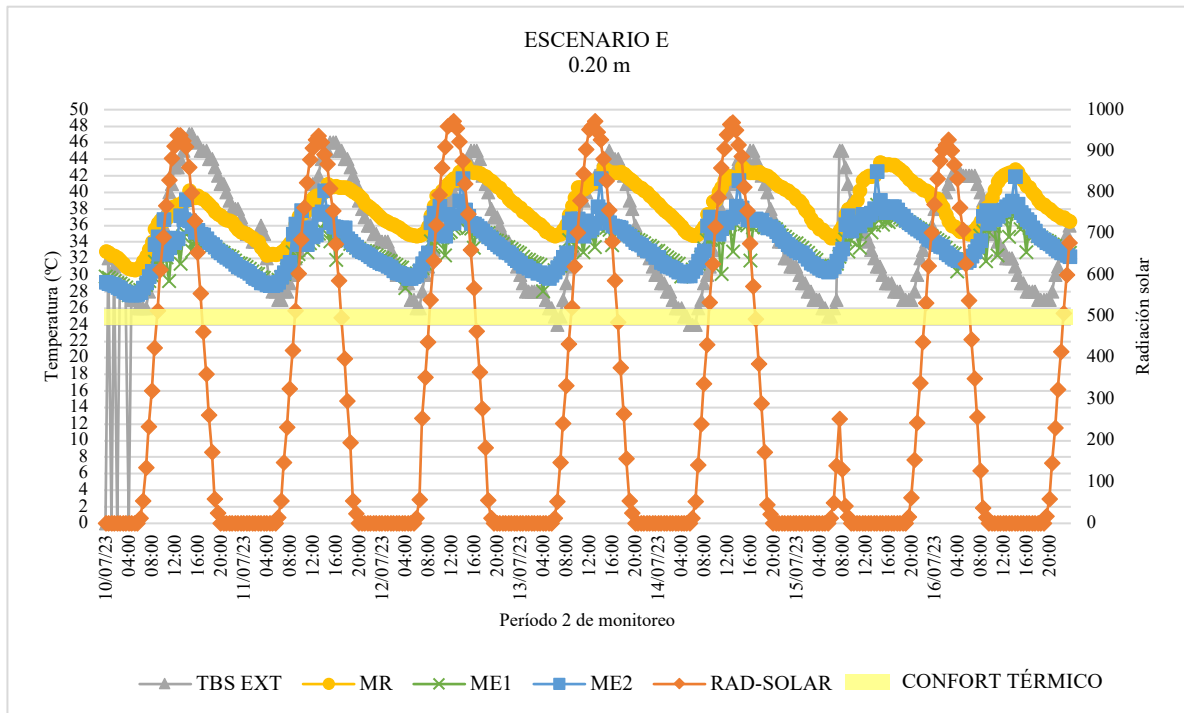


Figura 40.
Escenario E - período 2 (con sombra)





Por último, en el escenario F de 1.00 m en la cámara de aire, presentó el mismo comportamiento en el período 1, pues el ME1 registró una TS máxima de 45.8°C, sin embargo, en esta ocasión, el ME2 fue el de mayor TS máxima con 47.1°C (figura 42). Por otra parte, en el período 2 se dieron diferentes resultados con el de mayor TS, pues en esta ocasión le correspondió al MR sombreado con 47.9°C, mientras que el ME1 presentó la menor TS máxima con 44.2°C (figura 43).

Figura 42.
Escenario F - período 1 (sin sombra)

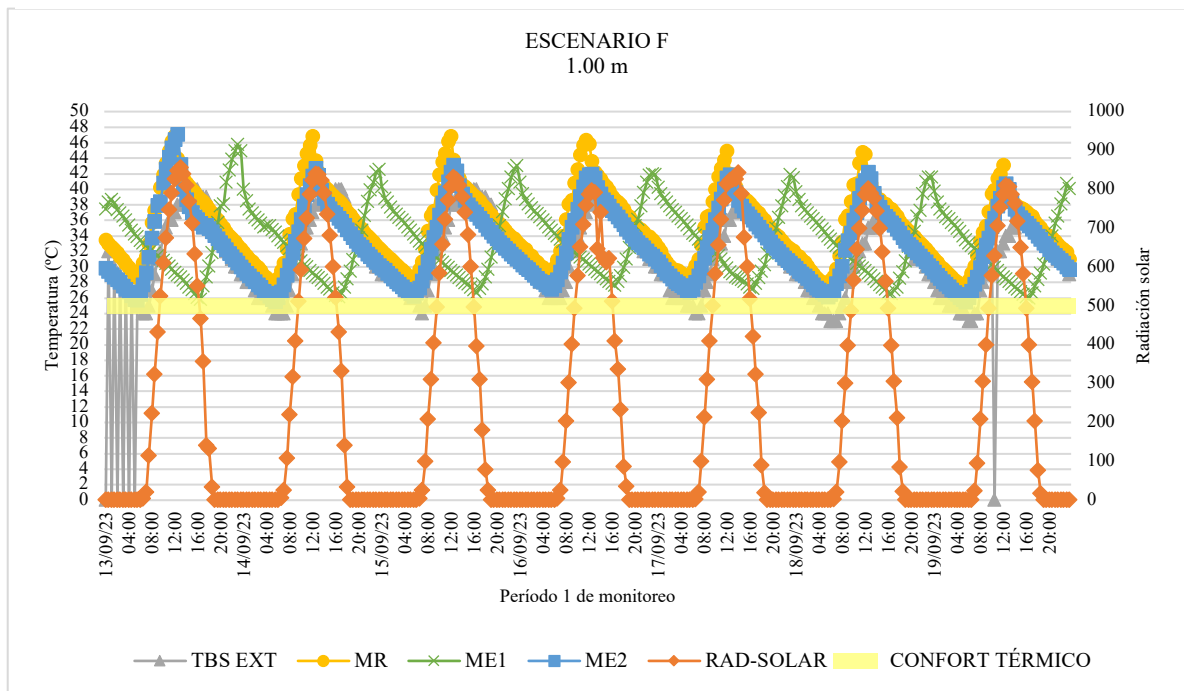
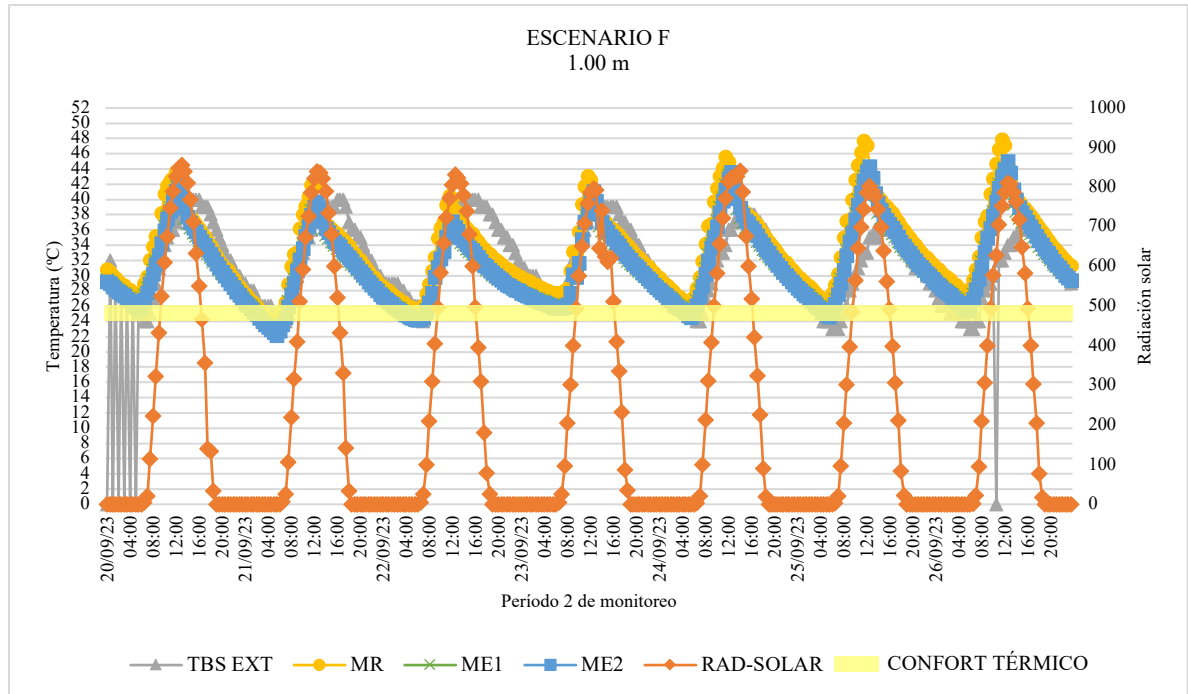


Figura 43.*Escenario F - período 2 (con sombra)*

Finalmente, se observa que, a excepción del escenario A, en ninguno de los cinco distintos escenarios resultó el MR sombreado el de mayor beneficio térmico. Por consiguiente, los análisis y resultados futuros se trabajaron con los datos obtenidos del MR sin sombra, el ME1 y ME2, por lo que, posteriormente se mostrarán datos del período 1 de los seis escenarios.

4.1.3 Día Representativo (DR)

Por lo anterior, en la tabla 10 presenta un concentrado del día representativo del período 1, en donde se muestra uno de los siete días de cada escenario evaluado, de esta manera se observa que aun cuando se monitorearon los espesores de la cámara de aire en



diferentes fecha se llegan a tener días con condiciones climáticas similares, lo que nos permite realizar esa comparación entre ellos.

Tabla 10.

Día Representativo (DR) del periodo 1 de cada escenario

Nombre	Fecha	T med temporada (°C)	T med día (°C)	Osc T temporada (°C)	Osc T día (°C)	Día representativo
Escenario A (0.05 m)	30 de agosto 2023	33.2	35.2	7.4	12.0	6.6
Escenario B (0.08 m)	28 de julio 2023	33.2	38.2	7.4	9.0	6.6
Escenario C (0.10 m)	28 de mayo 2023	33.2	29.1	7.4	19.0	7.5
Escenario D (0.15 m)	19 de junio 2023	33.2	31.5	7.4	15.0	5.9
Escenario E (0.20 m)	8 de julio 2023	33.2	31.3	7.4	20.0	10.7
Escenario F (1.00 m)	16 de septiembre 2023	33.2	32.9	7.4	13.0	5.3

4.1.4 Relación de Diferencias de Temperatura (TDR)

Así pues, como se mencionó en el subtema 3.4. *Procesamiento de datos* en el apartado 3.4.2. *Relación de Diferencias de Temperatura (TDR)*, el TDR establece el porcentaje de enfriamiento de cada caso analizado, por lo que, se presentan los resultados



de todos los escenarios monitoreados. De manera que, en la tabla 11 correspondiente al espesor de 0.05 m en la cámara de aire, podemos observar que tanto el ME1 como el ME2 cuentan con un porcentaje de enfriamiento por arriba del 50%, lo que indica que ambas técnicas resultan favorables térmicamente, sin embargo, el ME2 presenta hasta 70% de enfriamiento.

Tabla 11.
TDR - Escenario A (0.05 m)

Fecha	MR	ME1	ME2
24 de agosto 2023	3.8	52.1	56.8
25 de agosto 2023	12.1	63.3	68.0
26 de agosto 2023	10.6	57.2	61.6
27 de agosto 2023	12.7	64.3	69.9
28 de agosto 2023	12.0	64.9	71.4
29 de agosto 2023	14.7	66.8	73.7
30 de agosto 2023	-5.0	43.6	50.8

Por otro lado, en el caso del escenario B, debido a la falla en los registros de monitoreo térmico de la estación meteorológica no se contó con más de la mitad de datos de Temperatura ambiente, por lo que, en los primeros día no se tiene resultados, por ello se escribió Sin Dato (SD) en cada celda, sin embargo, a partir del cuarto día se observan resultados favorables en el ME1 y ME2, pues en la mayoría de los días presentaron porcentajes de enfriamiento por arriba del 50%, aun así el ME2 llega a tener hasta 15% más que el ME1 (tabla 12).



Tabla 12.

TDR - Escenario B (0.08 m)

Fecha	MR	ME1	ME2
24 de julio 2023	SD	SD	SD
25 de julio 2023	SD	SD	SD
26 de julio 2023	SD	SD	SD
27 de julio 2023	SD	SD	SD
28 de julio 2023	-2.2	50.2	65.1
29 de julio 2023	5.7	43.7	52.1
30 de julio 2023	31.5	61.8	70.7

Nota. SD se refiere a Sin Dato.

En cambio, en el escenario C, en donde el espesor en la cámara de aire es de 0.10 m, el porcentaje de enfriamiento que presenta ronda entre el 36% y 49%, aun cuando los resultados son favorables, en ninguno de los casos llega al 50%, mientras que en los dos escenarios anteriores el 50% es el mínimo (tabla 13).

Tabla 13.

TDR - Escenario C (0.10 m)

Fecha	MR	ME1	ME2
26 de mayo 2023	18.4	40.7	42.4
27 de mayo 2023	19.5	42.1	45.2
28 de mayo 2023	21.1	44.8	49.4
29 de mayo 2023	17.2	44.5	48.2
30 de mayo 2023	15.6	42.9	45.8
31 de mayo 2023	4.0	36.3	37.2
1 de junio 2023	17.2	42.4	45.5



Asimismo, el escenario D con el 0.15 m de espesor (tabla 14) y el E de 0.20 m (tabla 15) presentan condiciones similares, pues en la mayoría de los días de monitoreo, tanto en el ME1 como el ME2, el porcentaje de enfriamiento ronda en el 40% y entre ellos la diferencia es mínima con 3%, en donde la aplicación de la técnica configurada en el ME2 muestra ser más efectiva.

Tabla 14.

TDR - Escenario D (0.15 m)

Fecha	MR	ME1	ME2
13 de junio 2023	21.1	46.9	48.9
14 de junio 2023	15.6	45.5	48.2
15 de junio 2023	16.1	43.8	46.6
16 de junio 2023	17.2	45.5	47.9
17 de junio 2023	22.5	48.8	51.0
18 de junio 2023	11.2	44.5	46.5
19 de junio 2023	7.3	33.9	36.8

Tabla 15.

TDR - Escenario E (0.20 m)

Fecha	MR	ME1	ME2
3 de julio 2023	24.8	41.0	45.1
4 de julio 2023	23.7	42.2	47.1
5 de julio 2023	25.8	45.5	50.9
6 de julio 2023	19.0	39.7	44.2
7 de julio 2023	21.9	42.1	47.4
8 de julio 2023	32.5	44.7	49.8
9 de julio 2023	26.9	40.9	46.7



Por último, en el escenario F correspondiente al espesor en la cámara de 1.00 m, se muestra que ni en el ME1 ni en el ME2 el porcentaje de enfriamiento llega a ser del 5%, incluso en la mayoría de los días no existe tal fenómeno, pues hasta se presentan datos negativos, que indican calentamiento al interior, casi del 10% (tabla 16). Por lo que, aun cuando este escenario cuenta con ciertas cifras favorables, resultó el que menos confort térmico brindaría.

Tabla 16.

TDR - Escenario F (1.00 m)

Fecha	MR	ME1	ME2
13 de septiembre 2023	-1.9	2.5	3.6
14 de septiembre 2023	1.3	5.1	6.0
15 de septiembre 2023	0.0	3.8	3.6
16 de septiembre 2023	-12.3	-4.6	-4.7
17 de septiembre 2023	-10.7	-4.9	-5.4
18 de septiembre 2023	-12.1	-7.7	-9.9
19 de septiembre 2023	-7.9	-1.9	-3.7

4.2 Económicos

Con base a los resultados térmicos obtenidos, para el estudio de costo-beneficio, se analizó el caso óptimo, es decir, el escenario A del ME2 el cual contiene el muro vivo



continuo y una cámara de aire de 0.05 m. Así pues, con estos resultados se determinará si la aplicación de la técnica resulta favorable económicamente y si ésta presenta ahorros energéticos y el porcentaje de ahorro monetario.

4.2.1 Valor presente neto (VPN) y costo – beneficio

El análisis económico determinó que con el escenario A se presentan ahorros económicos anuales hasta del 35.72%, pues con el MR (muro de referencia) pagarían \$66.19 pesos mexicanos anuales por m² y con el ME2 (muro vivo continuo) \$42.55, mientras que la reducción del consumo energético por el uso de aire acondicionado fue de 37 kW, ya que el MR consumió 103.56 kWh y el ME2 66.57 kWh por m² y el ME2 (tabla 17). Por otro lado, el Valor Presente Neto (VPN) de la técnica ascendió a \$388,616.98 pesos mexicanos por m² durante una vida útil de 30 años, con un costo – beneficio de 37.57% y ahorros anuales de \$23.64 pesos mexicanos (figura 44).

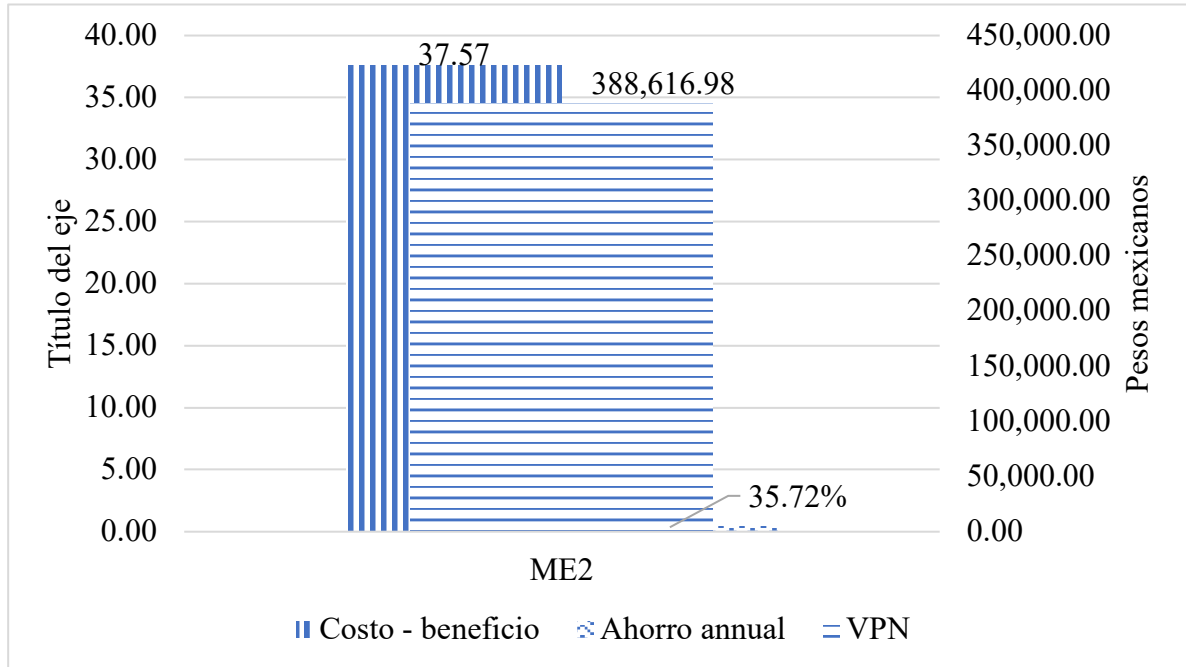
Tabla 17.
Consumo económico y energético del periodo cálido

Nombre	MR		ME2	
	Económicos (pesos mexicanos)	Energéticos (kW)	Económicos (pesos mexicanos)	Energéticos (kW)
mayo	\$13.24	17.26	\$8.51	11.10
junio	\$13.24	17.26	\$8.51	11.10
julio	\$13.24	17.26	\$8.51	11.10
agosto	\$13.24	17.26	\$8.51	11.10
septiembre	\$13.24	17.26	\$8.51	11.10
octubre	\$13.24	17.26	\$8.51	11.10



Figura 44.

Análisis económico ME2





5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo, a manera de conclusión, se presenta el proceso detallado a través del cual se lograron responder las preguntas de investigación y por tanto, cumplir con los objetivos planteados, además, de cómo se comprobó la hipótesis mencionada en el capítulo 2. Asimismo, se exponen recomendaciones para futuras investigaciones sobre la incorporación de muros vivos en las edificaciones.

5.1. Conclusiones

Para conocer el efecto de la optimización de la configuración de un muro vivo (MV) en la eficiencia energética de viviendas en serie en regiones áridas, las características físicas del MV, el desempeño que tiene su aplicación en los hogares, así como la forma de optimizarlo energética y económicamente se llevaron a cabo varios procesos, primeramente, una revisión teórica de investigaciones realizadas con esta técnica; diseño de la configuración del MV; evaluaciones térmicas IN SITU de distinta configuraciones y técnicas, incluido el sombreado y, finalmente, un análisis de factibilidad económica.

Así pues, tras la realización de la revisión bibliográfica se descubrió que existe una estrategia llamada Sistemas Verdes Verticales (SVV), integrados por muros verdes, de los cuales se derivan los directos e indirectos y los muros vivos, los cuales cuentan con dos tipos, el modular y el continuo. Gracias al análisis teórico, se determinó que la opción ideal para el caso de la ciudad de estudio, Mexicali, sería un muro vivo continuo, pues estos, debido a sus componentes y su método de crecimiento, conservan más la humedad,



además, estudios establecen que llegaba a reducir hasta 10°C de temperatura superficial y hasta el 60% de ahorro energético por el uso de aire acondicionado.

Aunado a lo anterior, se observó que, aun cuando existen investigaciones sobre la evaluación térmica y energética de estos SVV, se realizan análisis de las variables aisladas, es decir, el 52% de los estudios evalúan únicamente el efecto térmico que causa la implementación de esta técnica en las edificaciones; solo el 9% el consumo energético, sin embargo, el 24% analiza ambas variables, mientras que el 15% mide otras, como el ciclo de vida, el impacto ambiental, la percepción del usuario y un cálculo económico, este en conjunto con otras. Por tal motivo, se propuso que la presente investigación abordara tanto lo térmico, energético y la factibilidad económica a través de la evaluación experimental de la aplicación de un muro vivo continuo, así con esto se lograría alcanzar los objetivos planteados.

Asimismo, tras la investigación, se concluyó que las características físicas del MV apropiadas para un clima árido como el de Mexicali, son las que compone un muro vivo continuo, tal y como se describe en la sección *3.1.1 Clasificación de los Sistemas Verdes Verticales (VGS)* y en la figura 1, con una estructura de soporte de perfil metálico; su medio de crecimiento a partir del geotextil/geomembrana; el sustrato constituido 70% de musgo esfango canadiense, 20% perlita, 5% de humus de lombriz y 5% de composta; vegetación adaptada y comestibles y un sistema de riego por goteo controlado que se active seis veces al día, se establecieron ciertos horarios que se encuentran en la tabla 2.

Por otra parte, con los resultados térmicos se mostró que la implementación de cualquiera de las técnicas propuestas, es decir, un muro con sustrato y sistema de riego



(ME1) y un muro vivo (ME2), tiene un impacto positivo respecto al muros de referencia (MR), pues disminuye tanto la temperatura superficial (TS) hasta con 21°C como la temperatura interior (TBS) en todos los escenarios hasta más de 8°C, incluso se presentaron datos favorables en el escenario F el de la cámara de aire de 1.00 m de espesor, aunque en este caso la diferencia de TBS interior es de 1°C de igual manera existe un cambio de temperatura, sin embargo, en la temperatura superficial el ME2 presentó mayor TS que el MR y el ME1 con una diferencia de 1.3°C.

Por lo anterior, en cuanto a la TBS interior, aparentemente, cualquier escenario que se aplique en los muros de la vivienda resultaría favorable para el usuario, pues en todos los casos se presentan diferencias de temperatura respecto al MR, sin embargo, en algunos dicha cifra es mínima, tal y como se mencionó anteriormente. Por ello, en comparación con los seis casos de evaluación, se determina que el ME2 con el escenario A (cámara de aire de 0.05m) es el óptimo, pues obtuvo mayor amplitud con 8.8°C mientras que el ME1 tuvo 7.8°C, el resto de los escenarios mostraron datos positivos, sin embargo, no fueron mayor que el A en el ME2, pues el B en el ME1 presentó una reducción de temperatura máxima de 6.1°C y ME2 7.5°C; el escenario C 4.5°C en el ME1 y 5.4°C el ME2; D con 5.7°C y 6.0°C para el ME1 y ME2, respectivamente; el E 3.4°C en el ME1 y 4.3°C el ME2 y, por último, el F, como se mencionó anteriormente, fue el de menor beneficio.

Asimismo, ocurrió con los resultados de Temperatura Superficial (TS), como bien se mencionó, en uno de los escenarios se presentaron hasta 21°C de diferencia respecto al MR, esto fue en el A del ME1, este resultado no fue muy diferente en el ME2 pues tuvo 20.2°C, de igual manera, el de menor beneficio resultó el F, pues incluso el ME2 fue el de



mayor TS de los tres módulos. Sin embargo, los otros casos de estudio obtuvieron datos favorables también, pues el B en el ME1 registró 13.2°C menos que el MR y el ME2 12.8° en temperatura máxima; el C, 6.5°C y 7.1°C en el ME1 y ME2, respectivamente; el escenario D, mostró mejores condiciones que el C, pues tuvo 11°C menos en el ME1 y 9.8°C en el ME2, por último, en el E los resultados fueron de 6.2°C para el ME1 y 2.5°C el ME2.

De esta manera, podemos observar que con las dos variables de estudio analizadas se concluiría que el escenario A de 0.05 m de espesor en la cámara de aire en el ME2, correspondiente a la técnica con muro vivo, sería el caso óptimo, sin embargo, para corroborar lo anterior se compararon los resultados del Día Representativo (DR) que se pueden visualizar en la tabla 9 y los de Relación de Diferencia de Temperatura (TDR) que se muestran en la tabla 10, en donde se expresa el porcentaje de enfriamiento. Tras el análisis de datos, se comprobó que, efectivamente, el escenario A con la técnica ME2 es el caso óptimo para el caso de la ciudad de Mexicali, ya que, en su período de una semana de evaluación, el porcentaje de enfriamiento fue cerca del 60% respecto al MR.

Por otro lado, el resto de los escenarios de evaluación no se descartan como opciones para brindar enfriamiento al interior de la vivienda, pues aun cuando no presentaron mejores resultados que el escenario A las cifras fueron favorables, es decir, que si se deseara implementar el caso B con espesor de 0.08 m se obtendría entre 39.2 – 67.3% en el ME2 más respecto al MR y en el ME1 del 30.3 al 52.4%; en el C el porcentaje de enfriamiento rondaría, para el ME2, desde 23.9 % hasta el 33.2% y en el ME1 22.2 – 32.3%; el escenario D sería entre el 27.8% y el 35.3% en el ME2 y del 26.3% al 33.3%; el



E en el ME1 brindaría desde 12.2% hasta 20.7% y el ME2 entre 19.9% y 25.5%, por último, el escenario F presentó un cifras mínimas tanto en el ME1 como en el ME2 pues no sobrepasó ni el 8% en ninguno de las dos técnicas. Asimismo, se dio en la técnica de sombreado, la cual fue evaluada en el período 2 de los seis escenarios, pues cuando llegó a presentar mejores condiciones térmicas el MR sombreado que el ME1 o el ME2 la diferencia máxima fue de 3°C únicamente en el escenario A del ME2, sin embargo, el resto de las evaluaciones arrojó que implementar la técnica ME1 o ME2 promovía la reducción de temperatura interior con diferencias entre 0.2°C hasta 6.3°C.

Por lo anterior, se concluyó que para mejorar el desempeño térmico de una vivienda de construcción en serie implementar este tipo de sombreado no sería la opción de mayor beneficio para reducir la temperatura interior, sin embargo, aplicar la técnica de una barrera con sustrato, sistema de riego y cámara de aire o el muro vivo resulta favorable con cualquiera de sus espesores, pero para optimizar las condiciones y promover el confort térmico en los hogares lo adecuado sería instalar un muro vivo con una cámara de aire de 0.05 m de espesor, vegetación adaptada y de huerto, además, a su vez suministraría alimentos a los usuarios en temporadas de cosecha, proporcionaría un aspecto visual atractivo y no demandaría ni 0.10m del terreno.

Por otra parte, en el análisis de viabilidad económica, se observa que si bien la inversión inicial es levada, pues el usuario invertiría cerca de los \$11,000.00 pesos mexicanos por m², incluido el sistema de riego, los mantenimientos menores resultan con un costo monetario mínimo de menos de \$1,000 pesos mexicanos, además, el producto principal, que es el fertilizante, rinde para todo el período cálido, mientras que el



mantenimiento mayor sería cada siete años o más, pues dependería de la resistencia de la geomembrana. Asimismo, el beneficio que trae consigo es mayor, pues además del aspecto estético; producción de alimentos de huerto (fruta y verdura); de los térmicos, pues reduce más de 8°C y presentó un porcentaje de enfriamiento por arriba del 70%; consumo energético, ya que presentó ahorros de más de 37 kWh por m² respecto al muro de referencia (MR), también obtuvo ahorros económicos de más de 30%, lo que equivale a \$23.64 pesos mexicanos anuales.

Por lo anterior, el estudio de costo – beneficio determinó que su implementación es factible pues el resultado fue mayor al 30% y aun cuando el Valor Presente Neto (VPN) no resultó bajo (más de \$300,000 por los 30 años de vida útil), el análisis económico estableció que la aplicación de la técnica de un muro vivo continuo en una vivienda de construcción en serie en climas áridos coadyuva a la disminución del uso de sistemas de enfriamiento mecánico, pues llega a mantener en condiciones confortables al interior de la vivienda, con temperaturas oscilantes entre los 28°C y 36°C.

5.2. Recomendaciones

Así pues, con base a los hallazgos de la investigación de los resultados térmicos de Temperatura de Bulbo Seco (TBS), Temperatura Superficial (TS), Día Representativo (DR) y Relación de Diferencias de Temperatura (TDR); los energéticos sobre reducción de consumo energético (kWh) y los económicos de costo - beneficio y valor presente neto sobre la técnica de muro vivo continuo se proponen recomendaciones para futuros estudios en el campo, pues se sugiere llevar a cabo evaluaciones sobre el efecto de diferentes tipos



de plantas, es decir, realizarlos de manera específica para determinar el impacto de cada una de manera individual.

Asimismo, se considera pertinente realizar estudios adicionales en los que se analice la orientación de la implementación del muro vivo, no nada más en la fachada sur, así como replicar el proyecto en diferente ubicación geográfica y ampliar el período de monitoreo, además, sería conveniente evaluar la técnica en softwares de simulación térmico – energética para poder obtener más escenarios y/o configuraciones del muro vivo con distinta vegetación, por ejemplo, con pura vegetación adaptada, nada más con plantas de huerto, combinación de ambas pero únicamente las que tengan mayor Índice de Área Foliar (IAF), vegetación de un color, entre otras; orientaciones de aplicación, es decir, instalar el muro en el sur, el norte, este u oeste o bien, hasta en combinación de fachadas; diferentes espesores en la cámara de aire a los propuesto en esta investigación y del muro vivo, pues se puede implementar una hoja de aislamiento térmico en la parte posterior, misma que cubra también la líneas del sistema de riego; evaluación de otros sistemas constructivos en el muro de la envolvente, con sistemas ligeros o pesados, entre otros.

Por otra parte, otro estudio favorable sería la evaluación del ciclo de vida del muro vivo en conjunto con el impacto ambiental, para así conocer el efecto en la generación de las emisiones de CO₂, la disminuir el calor sensible, el enfriamiento evaporativo, la incorporación de humedad en el ambiente y como contribuye esto en el ciclo del agua urbano, así como un análisis a escala urbana en donde se estudie el beneficio de la incorporación de la técnica en las edificaciones para disminuir la Isla de Calor Urbana de



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de Sevilla

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

las ciudades. Además, resultaría interesante contar con información sobre la influencia en la salud mental del usuario, pues se dice que tener contacto con la naturaleza ayuda a reducir el estrés y los niveles de ansiedad, ya que provoca sensación de relajación; el cómo reduce el deslumbramiento y ayuda al confort visual de los usuarios; porque funciona como aislante acústico y actúa como barrera de absorción de contaminante para mejorar la salud de los habitantes.



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de Baja California

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

**MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO**

**MUROS VIVOS PARA ENFRIAMIENTO PASIVO EN VIVIENDAS DE
CONSTRUCCIÓN EN SERIE EN CLIMA CÁLIDO SECO**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO
DE DOCTORA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

PRESENTA
KARMINA DAMARIS REYES BARAJAS

Correo electrónico UABC: karmina.reyes@uabc.edu.mx

Correo personal: karmina_r25@hotmail.com

Identificador ORCID: 0000-0003-2255-8139

Director de tesis: Dra. Cristina Sotelo Salas
Identificador ORCID: 0000-0001-8685-4290

Co-director de tesis: Dra. Ramona Alicia Romero Moreno
Identificador ORCID: 0000-0002-5853-02-29

Comité tutorial:

Dr. Carlos Javier Esparza López
Identificador ORCID: 0000-0003-0058-5072

Dr. Daniel Antonio Olvera García
Identificador ORCID: 0000-0002-9293-7604

Dr. Daniel Hernández Balbuena
Identificador ORCID: 0000-0002-0055-4797

Mexicali B.C, octubre de 2024.



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de Sevilla

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO



REFERENCIAS

- Abd Ghafar, A., Haruna Abdulkarim, K., Said, I., & Jasmani, Z. (2018). Vertical Greenery Systems and Its Effect on Campus: a Meta-Analysis. *Journal of BIMP-EAGA Regional Development*, 4(4), 42–56. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3361319>
- Aditya, G., Muslim, F., & Riantini, L. S. (2022). *Study of Vertical Greening System Implementation at Flyover Structure in DKI Jakarta. Afshari 2017*.
- Arvizu, K. (2018). *Utilización del sistema de huertos urbanos en cubiertas para el mejoramiento del confort térmico de un espacio*.
- Baca, G. (s/f). *Ingeniería Económica*.
- Baca, G. (2013). Evaluación de Proyectos. En *Administración de SEP, Clases de 10mo. Nivel, Universidad Politécnica Salesiana (UPS), Escuela de Eléctrica*.
- Bartesaghi, C., Osmond, P., & Peters, A. (2018). Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources. *Solar Energy*, 166(February), 486–508. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.008>
- Bass, B., & Baskaran, B. (2001). *Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas Brad Bass; Bas Baskaran NRCC-46737*.
- Basunbul, A. I., & Braham, W. W. (2023). Climate responsive lessons from an architectural and ethnographic study of Hijazi traditional dwellings in Jeddah, Saudi Arabia. *Frontiers in Built Environment*, 9(May), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1127615>
- Bevacqua, M., Fionda, M. P., & Arcuri, N. (2018). *STUDY OF GREEN SURFACES AS PASSIVE COOLING TECHNIQUES IN BUILDINGS* (EdiBios di Irene Olivieri (ed.); pp. 69–78).
- Bhamare, D. K., Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. *Energy and Buildings*, 198, 467–490. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.023>
- Bojórquez, G., Gómez-Azpeitia, L. G., García-Cueto, O. R., Ruiz-Torres, R. P., & Luna, A. (2010). Temperatura neutral y rangos de confort térmico para exteriores, período cálido en clima cálido seco. *Ambiente Construido*, 10(2), 133–146. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212010000200009>
- Bustami, R. A., Beecham, S., & Hopeward, J. (2022). Evaporative Cooling Effect of Water-Sensitive Urban Design: Comparing a Living Wall with a Porous Concrete Pavement System. *Water (Switzerland)*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/w14223759>
- Campos-Ororio, A., Santillán-Soto, N., García-Cueto, O. R., Lambert-Arista, A. A., & Bojórquez-Morales, G. (2020). Energy and environmental comparison between a concrete wall with and without a living greenwall: A case study in Mexicali, Mexico.



- Sustainability (Switzerland)*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/su12135265>
- Campos-Osorio, M. de los Á. (2021). *Evaluación de superficies verdes verticales como estrategia de mitigación térmica en clima desértico-árido*.
- Carbajal-Avila, J., Rodríguez-rosales, A. A., Rodríguez-herrera, A. L., Ávila-caballero, L. P., & Hernández-cocoletzi, H. (2016). Percepción por un modelo de fachada vegetada. *Gestión y Ambiente*, 19(2), 264–272. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15446/ga.v19n2.55270>
- Chàfer, M., Pérez, G., Coma, J., & Cabeza, L. F. (2021). A comparative life cycle assessment between green walls and green facades in the Mediterranean continental climate. *Energy and Buildings*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111236>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), & Sistema Meteorológico Nacional (SMN). (2023a). *Temperatura Máxima Promedio por Entidad Federativa y Nacional 2021*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), & Sistema Meteorológico Nacional (SMN). (2023b). *Temperatura Media por Entidad Federativa y Nacional 2022*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Pronóstico%20climático/Temperatura%20y%20Lluvia/TMED/2022.pdf>, 1.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía [Conuee]. (2020). Eficiencia energética en el confort térmico en viviendas de clima cálido en México. *Cuadernos de la Conuee*, 5. <https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno5nvciclo.pdf>
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), Plataforma Nacional Energía Ambiente y Sociedad (Planeas), & Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronaces-ECC). (2022). *Patrones de consumo energético en el sector residencial de México: un análisis desde la perspectiva de usos finales Consejo*.
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), & Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronaces ECC). (2022). *Planteamientos del Pronaces Energía y Cambio Climático frente a la Iniciativa de Reforma Eléctrica*.
- CONUEE. (2017). *Costos y beneficios de la norma mexicana para envolvente de edificaciones residenciales (NOM-020- ENER)*. 1–24. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/234755/Impacto_NOM-020-junio-2017-FINAL.pdf
- Convertino, F., Vox, G., & Schettini, E. (2019). Convective heat transfer in green façade system. *Biosystems Engineering*, 188, 67–81. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.006>
- Cuce, E. (2017). Thermal regulation impact of green walls: An experimental and numerical



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad de la Universidad de los Andes

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

- investigation. *Applied Energy*, 194, 247–254.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.079>
- Dahanayake, K. W. D. K. C., & Chow, C. L. (2017). Studying the potential of energy saving through vertical greenery systems: Using EnergyPlus simulation program. *Energy and Buildings*, 138, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.002>
- Diario Oficial. (2011). *Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones.- Envoltante de edificios para uso habitacional*. 53(9), 47. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Djedjig, R., Belarbi, R., & Bozonnet, E. (2017). *Green wall impacts inside and outside buildings: experimental study*. 6.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.256>
- Elgizawy, E. M. (2016). The Effect of Green Facades in Landscape Ecology. *Procedia Environmental Sciences*, 34, 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.012>
- Feitosa, R. C., & Wilkinson, S. (2017). Retrofitted green roofs and walls and improvements in thermal comfort. *AIP Conference Proceedings*, 1856(June).
<https://doi.org/10.1063/1.4985558>
- Feria Díaz, J. J., Sierra Carrillo, J. E., & Rodríguez Miranda, J. P. (2019). *Passive cooling in sustainable constructions : a Review for Latin America*. 10(07), 289–297.
<http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=07> 1.
- Francis, R., & Lorimer, J. (2011). Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *Journal of environmental management*, 92, 1429–1437.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.012>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*.
- Ghunaim, A., & Kim, Y. K. (2024). Reviewing the Effect of Indoor Living Walls on Air Quality, Energy Consumption in Different Climates. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 906 LNNS(June), 55–66. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53824-7_6
- Gonzalez, E. M., Pedraza, A., & Pérez, M. (2009). Caracterización agrológica del suelo y diagnóstico de su fertilidad en la estación experimental del campus Nueva Granada, Cajicá (Cundinamarca, Colombia). *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 4(1), 82–104. <http://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/2123/1662>
- González, F. (2012). *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación*.
- Gromke, C., Blocken, B., Janssen, W., Merema, B., van Hooff, T., & Timmermans, H. (2015). CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Building and Environment*, 83, 11–26. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.022>
- Halawa, E., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Trombley, J., Hassan, N., Baig, M., Yusoff, S. Y., & Azzam Ismail, M. (2018). A review on energy conscious designs



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de los Ríos

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

- of building façades in hot and humid climates: Lessons for (and from) Kuala Lumpur and Darwin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(June 2017), 2147–2161. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.061>
- Hernández, M. E., & García, E. (1997). Condiciones climáticas de las zonas áridas en México. En *Geografía y Desarrollo* (p. 18). Revista del Colegio Mexicano de Geografía, A.C.
- Hoffmann, K. A., Šuklje, T., Kozamernik, J., & Nehls, T. (2021). Modelling the cooling energy saving potential of facade greening in summer for a set of building typologies in mid-latitudes. *Energy and Buildings*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110816>
- Hunter, A. M., Williams, N. S. G., Rayner, J. P., Aye, L., Hes, D., & Livesley, S. J. (2014). Quantifying the thermal performance of green façades: A critical review. *Ecological Engineering*, 63, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.021>
- INEGI. (2018). *Encuesta Nacional Sobre Consumo De Energéticos En Viviendas Particulares*. 28. <http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodemo/ENCEVI2018.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (INEGI). (2021). 7. *Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos*. <https://www.agenda2030.mx/ODSGoalSelected.html?ti=T&cveArb=ODS0070&goal=0&lang=es#/ind>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (INEGI). (2023). *Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC)*.
- Li, J., Zheng, B., Chen, X., Qi, Z., Bedra, K. B., Zheng, J., Li, Z., & Liu, L. (2021). Study on a full-year improvement of indoor thermal comfort by different vertical greening patterns. *Journal of Building Engineering*, 35(June 2020), 101969. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.101969>
- Li, J., Zheng, B., Shen, W., Xiang, Y., Chen, X., & Qi, Z. (2019). Cooling and energy-saving performance of different green wall design: A simulation study of a block. *Energies*, 12(15). <https://doi.org/10.3390/en12152912>
- Licón-Portillo, J. A., Esparza-López, C. J., Alcántara-Lomeli, A., & Martínez-Torres, K. E. (2017). Vegetación como Estrategia de Enfriamiento Pasivo: en Búsqueda de Nuevo Conocimiento. *Cuadernos de Arquitectura y Asuntos Urbanos*, 7, 73–85. <http://cuadernos.uanl.mx/pdf/num7/7.pdf>
- Lopez-Ordoñez, C., Cabillo, I. C., Calzada, J. R., & Roura, H. C. (2022). Low-Cost Architectural Strategies to Reduce Heat Stress in Social Housing for Hot Desert Climates. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 263(January), 171–181. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6269-0_15



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de los Ríos

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

- Luna-Flores, W., Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J., & Pinzón-López, L. (2012). Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana*, 30, 343–353. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v30n4/2395-8030-tl-30-04-00343.pdf>
- Luna, A. (2019). *COSTO de Energía CFE 2019*.
- Machado, M., Brito, C., & Neila, J. (2000). The ecological roof as material of construction. *Informes de la Construcción*, 52(467). <https://doi.org/10.3989/ic.2000.v52.i467.705>
- Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41(January 2018), 863–871. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>
- Miguel, S., Figueira, A., Faggi, A., & Gabin, J. (2017). Cubiertas Verdes y Jardines Verticales. Comportamiento Térmico y Acústico de Sistemas Modulares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 21(2314–1433), 13–24.
- Minke, G. (2012). *Muros y fachadas verdes, jardines verticales* (J. A. Moreno G. (ed.); Merlín SE).
- Naciones Unidas (ONU). (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. *The Sixteenth Century Journal*, 40. <https://doi.org/10.2307/20479128>
- Nan, X., Yan, H., Wu, R., Shi, Y., & Bao, Z. (2020). Assessing the thermal performance of living wall systems in wet and cold climates during the winter. *Energy and Buildings*, 208, 109680. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109680>
- Netam, N., Sanyal, S., & Bhowmick, S. (2019). Assessing the Impact of Passive Cooling on Thermal Comfort in Lig House Using Cfd. *Journal of Thermal Engineering*, 5(5), 414–421. <https://doi.org/10.18186/THERMAL.623212>
- Nugroho, A. M. (2020). The Impact of Living Wall on Building Passive Cooling: A Systematic Review and Initial Test. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 448(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/448/1/012120>
- Olivieri, F., Grifoni, R. C., Redondas, D., Sánchez-Reséndiz, J. A., & Tascini, S. (2017). An experimental method to quantitatively analyse the effect of thermal insulation thickness on the summer performance of a vertical green wall. *Energy and Buildings*, 150, 132–148. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.068>
- Omrany, H., GhaffarianHoseini, A., GhaffarianHoseini, A., Raahemifar, K., & Tookey, J. (2016). Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1252–1269. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.010>
- Oquendo-Di Cosola, V., Olivieri, F., Ruiz-García, L., & Bacenetti, J. (2020). An environmental Life Cycle Assessment of Living Wall Systems. *Journal of*



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad de los Talentos

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

Environmental Management, 254(May 2019), 109743.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109743>

- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2023). *Los récords climáticos se han sucedido en 2023 y han conllevado graves consecuencias | Organización Meteorológica Mundial*. <https://wmo.int/es/news/media-centre/los-records-climaticos-se-han-sucedido-en-2023-y-han-conllevado-graves-consecuencias>
- Ottelé, M., & Perini, K. (2017). Comparative experimental approach to investigate the thermal behaviour of vertical greened façades of buildings. *Ecological Engineering*, 108(September), 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.016>
- Palacios, J. (s/f). *BASES AGRONÓMICAS PARA EL DESARROLLO DE JARDINES VERTICALES*. 49.
- Pan, L., Wei, S., Lai, P. Y., & Chu, L. M. (2020). Effect of plant traits and substrate moisture on the thermal performance of different plant species in vertical greenery systems. *Building and Environment*, 175(January), 106815. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106815>
- Perini, K., Bazzocchi, F., Croci, L., Magliocco, A., & Cattaneo, E. (2017). The use of vertical greening systems to reduce the energy demand for air conditioning. Field monitoring in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 143, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.036>
- Quiroa-Herrera, J. A., Villanueva-Solís, J., González-Calderón, A. J., & Retana-Olvera, A. (2021). Capacidad de mitigación de tres materiales constructivos de acuerdo con su desempeño térmico en Zonas Áridas, Caso de estudio: Torreón, Coahuila. *Academia XXII*, 11(22), 216–231. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252xp.2020.22.77413>
- Rajak, M. K., & Kumar, R. (2022). *Vertical Greenery Systems : a comprehensive review*. 3(3), 117–135.
- Razzaghmanesh, M., & Razzaghmanesh, M. (2017). Thermal performance investigation of a living wall in a dry climate of Australia. *Building and Environment*, 112, 45–62. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.023>
- Reyna, A. A., & Molar, M. E. (2017). Jardín vertical con botellas de PET. En vivienda de interés social caso de estudio en Saltillo, Coahuila. *Revista Ciencia Acierta*, 61.
- Rodríguez, J. P., Raffailac, J.-P., & Alcón, C. L. (2017). *Uso del programa Sigma Scan Pro 5 para la Determinación del Área Foliar en Quinoa Universidad Mayor de San Andrés Facultad de Agronomía Ingeniería Agronómica Instituto de Investigación para el Desarrollo y Cooperación (IRD) Elaborado por : Jean-Pierre R. April 2006*.
- Safikhani, T., Abdullah, A. M., Ossen, D. R., & Baharvand, M. (2014). Thermal impacts of vertical greenery systems. *Environmental and Climate Technologies*, 14(1), 5–11. <https://doi.org/10.1515/rtuect-2014-0007>



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Universidad de las Américas

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

- Salguero-Gómez, R., Siewert, W., Casper, B. B., & Tielbörger, K. (2012). A demographic approach to study effects of climate change in desert plants. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1606), 3100–3114. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0074>
- Sánchez-Reséndiz, J. A., Ruiz-García, L., Olivieri, F., & Ventura-Ramos, E. (2018). Experimental assessment of the thermal behavior of a living wall system in semi-arid environments of central Mexico. *Energy and Buildings*, 174, 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.060>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos, & Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). *Se registra la temperatura más alta en Mexicali desde 1981*. 18, 5516400.
- Secretaría de Salud. (2023). *Temperaturas naturales extremas (Temporada de calor 2023)*. 1–11.
- SEDATU, & CONAVI. (2017). *Código de Edificación de Vivienda*.
- SEMARNAT. (2008). Informe de la situación del medio ambiente en México. *Suelo capítulo 3 SEMARNAT*, 120–154. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf
- Sendra-Arranz, R., Oquendo, V., Olivieri, L., Olivieri, F., Bedoya, C., & Gutiérrez, A. (2020). Monitorization and statistical analysis of south and west green walls in a retrofitted building in Madrid. *Building and Environment*, 183(March). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107049>
- SENER, CONUEE, IEA, CASEDI, WRI MÉXICO, GIZ, Danish Energy Agency, & INEVV. (2017). *Hoja de Ruta para el Código y Normas de Eficiencia Energética para Edificaciones en México* (p. 38).
- Shafíee, E., Faizi, M., Yazdanfar, S. A., & Khanmohammadi, M. A. (2020). Assessment of the effect of living wall systems on the improvement of the urban heat island phenomenon. *Building and Environment*, 181(January), 106923. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106923>
- Sheweka, S., & Magdy, N. (2011). The living walls as an approach for a healthy urban environment. *Energy Procedia*, 6, 592–599. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.068>
- Sotelo-Salas, C. (2020). *Efecto de enfriamiento evaporativo en fachada ventilada. Estudio en clima cálido seco extremo*.
- Šuklje, T., Medved, S., & Arkar, C. (2016). On detailed thermal response modeling of vertical greenery systems as cooling measure for buildings and cities in summer conditions. *Energy*, 115, 1055–1068. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.095>
- Tamara, L., & Ducuara, J. (2016). *Informe - CAPACIDAD DE CAMPO Y PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE - fisiología vegetal*. 1–8.



https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/60250337/Informe_-_CAPACIDAD_DE_CAMPO_Y_PUNTO_DE_MARCHITEZ_PERMANENTEP_-_fisiologia_vegetal20190809-31329-2v1ipz-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1627957734&Signature=E1qWb~y81UWU9hGWf4N494JDf4w0YG64UZG5sTwdXklzKOt9JLkh

- The Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2023). *Summary for Policymakers of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- UN-Habitat. (2021). *Cities and Pandemics : Towards a More Just , Green and Healthy Future*. https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/03/cities_and_pandemics-towards_a_more_just_green_and_healthy_future_un-habitat_2021.pdf
- van de Wouw, P. M. F., Ros, E. J. M., & Brouwers, H. J. H. (2017). Precipitation collection and evapo(transpi)ration of living wall systems: A comparative study between a panel system and a planter box system. *Building and Environment*, 126(July), 221–237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.002>
- Vásquez, I. (2016). Tipos de estudio y métodos de investigación. *Gestiopolis*, 1–12. <https://nodo.ugto.mx/wp-content/uploads/2016/05/Tipos-de-estudio-y-métodos-de-investigación.pdf>
- Vázquez, J. E. (1991). *Alternativas de adecuación ambiental en la vivienda, para ahorro de energía en la ciudad de Mexicali*.
- Victorero, F., Vera, S., Bustamante, W., Tori, F., Bonilla, C., Gironás, J., & Rojas, V. (2015). Experimental study of the thermal performance of living walls under semiarid climatic conditions. *Energy Procedia*, 78(June), 3416–3421. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.160>
- Victoria-Mercado, M., Barea-Paci, G., Esteves, A., & Filppín, C. (2018). *Efecto de la ventilación natural en el consumo energético de un edificio bioclimático. Análisis y estudio mediante EnergyPlus*. 54–67. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/hs/v8n1/0719-0700-hs-8-01-00054.pdf>
- Wahba, S. M., Kamel, B. A., Nassar, K. M., & Abdelsalam, A. S. (2018). Effectiveness of Green Roofs and Green Walls on Energy Consumption and Indoor Comfort in Arid Climates. En *Civil Engineering Journal* (Vol. 4, Número 10, p. 2284). <https://doi.org/10.28991/cej-03091158>
- Wang, P., Wong, Y. H., Tan, C. Y., Li, S., & Chong, W. T. (2022). *Vertical Greening Systems : Technological Benefits , Progresses and Prospects*. 1–25.
- World Resources Institute (WRI). (2021). *Cuatro gráficos que explican las emisiones de gases de efecto invernadero por país y por sector | Instituto de Recursos Mundiales (WRI)*. <https://es.wri.org/insights/cuatro-graficos-que-explican-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-por>
- Yazdanseta, A. (2017). *Estimating the cooling power through transpiration of Vining*



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad de los Polígonos

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

Green Walls in various climates. 8. <https://doi.org/10.22360/simaud.2017.simaud.026>
CITATIONS

Yin, H., Kong, F., Middel, A., Dronova, I., Xu, H., & James, P. (2017). Cooling effect of direct green façades during hot summer days: An observational study in Nanjing, China using TIR and 3DPC data. *Building and Environment*, 116, 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.020>



ANEXOS

Anexo 1. Tabla de casos de estudio Estado del Arte

Casos de estudio								
Autor (es)	Año	País/Ciudad	Tipo de estudio	Clima	Estrategia(s)/técnicas	Resultados	Recomendaciones	Limitaciones
Omraney, H. et al.	2016	Varios	Teórico	N/A	Sistemas pasivos en muros: Muro trombe, fachadas con doble piel, material cambio de fase, muro verde, fachadas inteligentes.	Muro trombe: reduce 4.52% de consumo energético diario e incrementa 27.2% eficiencia térmica.	El hormigón celular aireado y los muros verdes tienen beneficios acústicos. Estos últimos brindan bienestar psicológico a los usuarios y cambian la imagen del sitio.	



Suklje, T. et al.	2016	Liubliana, Eslovenia	Experimental y numérica	Continental	<p>Sistemas Verdes Verticales (VGS): muro verde indirecto</p> <p>*Temperatura superficial es 9 K más alta que en la cámara de aire. Con dos capas de vegetación existe un ahorro de 34 K. *Reduce el flujo de calor en la superficie interior hasta 77%</p>	Realizar simulaciones mediante el caso de referencia y el de la aplicación de la técnica, se aplicaron en el mismo muro
Carbajal-Ávila et al.	2016	Acapulco, México	Quasi experimental	Cálido-húmedo	<p>Fachada vegetada: muro verde indirecto</p> <p>*71.8% de los encuestados obtuvieron sensación de frescura. *60.5% cree ayuda a reducir la temperatura interior y al</p>	<p>*Sugerir mejoras políticas, directrices y campañas para su aplicación. *Entrevistas a profesionales de construcción, en estructura</p>



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad de los Polígonos

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

ahorro as e
energéti instalaci
co, el ones
18.5% para
en la identific
calidad ar
del aire dimensi
y el ones y
17% en material
lo es para
estético. mejorar
*Econo la
micame fijación.
nte *Elabor
accesibl ar
e: políticas
69.4% públicas
cree que para el
sí y el uso de
30.6% la
que no. técnica.
*Color
llamativ
o:
45.2%
amarillo
, 21.8%
azul,
16.9%
blanco,
11.3%
morado
y 4.8%
otros.
*Interés:
92.7%
lo tiene
y el
7.3%
no.



Dahana yake, K.W.D. K.C. y Chow, C.L.	2017	Wuhan, China y Hong Kong, Japón	Experimental y Simulación: Modelo matemático	Sub-tropical húmedo	Sistemas Verdes Verticales (VGS): muro verde indirecto	*Reduce la temperatura superficial al exterior hasta 26 °C y 3% del consumo anual de energía por refrigeración en climas cálidos	*Utiliza r en climas cálidos	*Evaluación del desempeño térmico. *Estudio experimental simultáneo (no con datos de otras investigaciones)
Licón-Portillo, J. et al.	2017	Varios	Teórico	N/A	Enfriamiento pasivo: vegetación	La vegetación representa un ahorro energético entre 50 - 65% en patios y calles. El área foliar y la densidad influyen en la temperatura.	El estudio de la técnica puede realizarse en campo, por simulación y, complementariamente, con modelos matemáticos	*Mediciones IN SITU. *Simulación para evaluar desempeño térmico y energético.



Cuce, E.	2017	Notting ham, Inglaterra	Experim ental y numéric a	Cálido	Muros verdes	*Reducc ión de temperat ura suprerfi cial hasta 6.1%. *Tempe ratura de ambient e disminu ye hasta 4 °C.	* Es fundame ntal elegir la orientaci ón, intesida d y caracterí stica de la planta para regular las condicio nes térmicas	*Evalua ción del desempe ño energéti co.
Olivieri, F. et al.	2017	Colmen ar Viejo, Madrid	Simulac ión y experim ental	Mediterr áneo	Enfría miento pasivo: muro verde	*El muro verde actua como enfriami ento pasivo si este tiene un aislamie nto adecuad o. *El mejor desempe ño energéti co se da con un aislamie nto.	Realizar una simulaci ón detallad a, con cargas térmicas en el edificio y que esta se realice también en período de invierno y con diferent es sistemas de calefacc ión y	



refrigera
ción

Perini, K. et al.	2017	Ciudad de Génova, Italia	Experim ental	Mediterr áneo	Sistema s Verdes Vertical es (VGS): muro vivo	*Ahorro energéti co del 26% en período cálido. *Difere ncia de temperat ura entre el aire exterior y el de la cámara de aire del muro vivo de 10 °C	*Más evaluaci ones para analizar la contribu ción de la técnica en el control climátic o de los edificios . *Integra r dispositi vos de reposici ón de aire	*Consid eracione s físicas y térmicas de la vegetaió n. *Valida ción de datos mediant e simulaci ón
Ottelé, M. y Perini, K.	2017	N/A	Experim ental	N/A	Fachad as verdes: muro verde directo y muro vivo	*Muro verde directo: disminu ye temperat ura superfici al 1.7 °C *Muro vivo modular : disminu	Realizar más investig aciones, con diferent es configur aciones y caracterí sticas, para calcular	



					ye temperat ura superfici al 8.4 °C	con mayor precisió n el valor de resistenc ia térmica de los sistemas verdes		
Yin, H. et al.	2017	Nanjing, Chna	Experim ental	Monzón ico sub- tropical	Enfria miento: muro verde directo	La temperat ura de la superfici de tiene una reducció n máxima de 4.67 °C	Utilizaci ón de equipos de medició n como el scaner láser 3D y la cámara termogr áfica	
Djedjig, R. et al.	2017	La Rochelle, Francia	Experim ental	Oceánic o	Muro verde	*Tempe ratura media radiante interior: disminu ye 10 °C. *Tempe ratura del aire y operativ a interior: disminu ye 5 °C.	Conside rar el entorno urbano (edificio s contiguo s, suelo)	No obtuvier on evaluaci ón energéti ca



Razzagh
manesh,
M.y
Razzagh
manesh,
M.

2017

Adelaid
e,
Australi
a

Experim Mediterr
ental áneo

**Muro
vivo**

*Difere ncia de temperatura superficial entre muro de referencia y muro vivo de 2 °C - 15 °C en verano. 7 °C - 18 °C en invierno .
*Difere ncia de temperatura media máxima en días cálidos de 14.9%.
*Simulación del muro vivo en los edificios . *Muro vivo continuo con plantas de mayor potencia l de evaporación. *Inspiración. *Invertir por un período largo el desempeño térmico y que se considere la edad de muro y la cobertura vegetal. *Conectar el sistema de riego con el de captación de agua de
*Aplicación de técnica en una fracción del muro y no en su totalidad .
*Validación por simulación. *Evaluación energética. *Análisis económico



					la cubierta. * Evaluar el impacto del riego con el de la refrigera ción con interval o de un minuto	
Van de Wouw, P.M.F. et al.	2017	Países Bajos	Experim ental y Simulac ión: Modelo matemát ico	Oceánic o templad o	Muro vivo: modular y panel *Difere ncia de evapotra nspiraci ón (ET) media y de referenc ia: 1.46 para muros vivos con paneles y 0.76 para muros vivos modular es. *Potenci a ET total muro vivo con panel de 21 W/m2 por año	*Muros vivos modular es recolect an mayor precipita ción y tienen mayor porcenta je de evapora ción. *Evalua ción por un período prolong ado *Evalua ción de desempe ño térmico - energéti co. *Simula ción. *Solo dos meses de evaluaci ón



y para
muro
vivo
modular
23
W/m2.
*Muro
vivo
modular
: mayor
precipita
ción
26.5% y
radiació
n
utilizada
de 4 -
38 %.
*Muro
vivo con
paneles:
precipita
ción de
13.6%
y
utilizaci
ón de
radiació
n solar
de 16 -
36 %.

Halawa, E. et al.	2018	Kuala Lumpur, Malaysi a y Darwin, Australi a	Teórico	Cálido y húmedo	Enfria miento pasivo: fachadas opacas y traslúcid as	*La fachada verde reduce la temperat ura superfici al externa del muro y la	*Fachad a verde: recomie nda la correcta selecció n de plantas y un buen manteni miento. No la
----------------------	------	--	---------	--------------------	---	---	--



temperatura interior. *Fachadas traslúcidas: bajo desempeño térmico si es de una hoja. *Material cambio de fase: mantiene la temperatura interior dentro del rango de confort térmico, reduce consumos energéticos

Bevacqua, M. et al.	2018	Brescia y Cosenza, Italia	Simulación	Mediterráneo	Enfriamiento pasivo: muro vivo y cubierta verde	*Cubierta verde y muro vivo reducen el consumo de energía enfriamiento y la demanda	Recomiendan no aplicar aislamiento para un mejor desempeño térmico y
---------------------	------	---------------------------	------------	--------------	--	---	--



a de energético
consumo.
o
energético
co
anual.
*El
muro
vivo
reduce
hasta
40% la
demanda
de
energía
en
climas
cálidos.
*La
aplicación
de
vegetación
solo
en el
muro
sur no
beneficia
a el
desempeño
energético
en
período
cálido.

Wahba, S. et al.	2018	El Cairo, Egipto	Simulación	Desértico o cálido	Sistemas verdes: cubiertas y muros verdes	* Cubiertas y muro verde reducen entre 17% y 25% el consumo	Realizar estudios económicos de la aplicación de las técnicas
---------------------	------	------------------------	------------	-----------------------	--	---	---



energético
anual,
mejoran
el
confort
térmico
tres
valores
en la
escala
PMV y
la
temperatura del
aire
interior
5°C. *
Espesor
del
suelo
ideal
para
climas
cálidos
es de
0.15 m.

					Sistemas verdes:	*Temperatura interior disminuyó 2 °C. *	*Evaluar la técnica con otros material	No contaban con un sistema de riego autónomo,
Sánchez - Reséndiz, J.A. et al.	2018	Querétaro, México	Experimental	Semi-árido		Temperatura media interior se mantuvo en 21 °C durante el período cálido.	es y/o en combinación con otras técnicas para el período frío. *Analizar el	debido a los altos consumos de agua por los usuarios y los bajos niveles



						impacto de social precipitación en la implementación de la ciudad. técnica
Convertino, F. et al.	2019	EUA e Italia	Cuasi experimental	Mediterráneo	Sistema pasivo: Fachadas verdes	Diferencia de temperatura entre la temperatura de aire exterior y la temperatura de aire entre la estructura de la fachada (muro) verde puede ser hasta 4 °C Brindan bienestar psicológico a los usuarios, cambian la imagen del sitio y tienen beneficios acústicos.
Bhamare, D.K. et al.	2019	Varios	Teórico	N/A	Enfriamiento pasivo: Vegetación, sombreado, vidrios eficientes, material cambio de fase, enfriamiento	Vegetación activa: reduce temperatura interna 3 °C a 7 °C y ahorros energéticos 6.1% a 29%. Vidrios Recomendación y mantenimiento de las técnicas. Oportunidad de estudio



evapora ivo directo e indirecto, ventilación, muro trombe, chimena solar. **eficient es en ventana s:** 2.4% a 60% de ahorros energéticos. **Sombreado:** reduce temperatura interior 2°C y ahorros energéticos de 1.6% a 30%. **Muro trombe:** reduce temperatura interior de 2 °C a 8 °C y ahorros energéticos hasta 72.9%.

Netam, N. et al.	2019	Raipur, India	Experimental y simulación	Sabana tropical	Enfriamiento pasivo: muro y cubierta verde y sombreado.	*Cubierta y muro verde: llega a reducir 4 °C la temperatura interior.	*Para obtener mejores resultados recomiendan la combinación de técnicas
------------------	------	---------------	---------------------------	-----------------	--	--	--



*Las técnicas empleadas son efectivas, sin embargo, no se logran las condiciones de confort térmico pasivas. *Determinaron que la dimensión de las ventanas no tiene un impacto significativo la reducción de temperatura interna.

					<p>Enfriamiento pasivo: muro verde y muro vivo</p>	<p>*Muro verde: utiliza plantas trepadoras. Reducción de temperatura en muro exterior de 9°C e interior entre 0.5 y 10°C (clima tropical). En climas cálidos y húmedos entre menor sea la</p>	<p>Recomiendan estudios de las características de cada una de las especies de plantas para cada tipo de clima, para su correcta selección. El buen mantenimiento es necesario.</p>	<p>*Validación del desempeño térmico por simulación. *Evaluación del desempeño energético</p>
Nugroho, A.M.	2019	Varios	Teórico y experimental	N/A y Tropical (experimental)				



cavidad Selección
de aire nar
serán vegetaci
mejores ón
los nativa y
resultad que se
os. realicen
***Muro** más
vivo: investig
arbustos aciones
y sobre la
herbáce integraci
as ón de
ventilaci
ón en
los
muros
verdes.

					Fachadas verdes: muro verde y muro vivo	*Muro verde: enfria la temperatura interior 1.5 °C. Temperatura superficial del muro exterior disminuye 0.5 °C y muro interior 0.9 °C. Presenta un ahorro energético de 6.29%. *Muro	Considerar el efecto de las edificaciones que se encuentran alrededor y el proceso de fotosíntesis de la planta y realizar evaluaciones para período frío y de conservación de calor.	*El método de mayor beneficio fue creación de uno de los autores para esa investigación. *Validación con simulación
--	--	--	--	--	---	--	---	---

Jiayu Li
et al.

2019

Hunan,
China

Experimental

Sub-tropical
húmedo



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad de los Pinos

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

vivo
modular: enfría
3.5 °C.
Temperatura
superficial del
muro exterior
disminuye 0.5
°C y muro
interior
3.1°C.
Presenta un
ahorro energético
de 15.37%.
***Muro**
vivo
con
súper
suelo: enfría
4.5 °C.
Temperatura
superficial del
muro exterior
disminuye 2 °C
y muro interior
3.9 °C.
Presenta un
ahorro energético



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad de los Polígonos

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

co de
19.92%.

Yazdans eta, A.	2019	N/A	Simulac ión: Modelo matemát ico	Varios	Enfria miento pasivo: muro verde	Potencia l de enfriami ento con 377 w/m2 a través de la transpira ción del dosel	Realizar más estudios de la influenc ia de la altura del dosel.	Resultad os de reducció n de temperat ura ambient al, de ahorro energéti co ni de condicio nes de confort térmico
--------------------	------	-----	---	--------	---	--	---	---



Feria, J.J. et al.	2019	América Latina	Teórico	Varios	<p>Enfriamiento pasivo: *Protección térmica: (vegetación, cubierta estanque, aspersiones y dispositivos de control de sombra) . *Modulación térmica: masa térmica, material cambio de fase, muro acumulador. *Disipación de calor: Convección: ventilación natural, flotabilidad impulsada por aire, muro</p> <p>*Cubierta verde redce la temperatura interior hasta 4.5 °C. *Muro verde: disminuye 2.3 °C . *Para climas cálidos-áridos mejores técnicas: cubierta estanque, cubierta y muro verde, enfriamiento evaporativo. *Climas cálido - húmedo: enfriamiento convectivo. Realizar simulación y/o mediciones IN SITU *Validación de datos por simulación y/o experimento. *Mayor revisión bibliográfica</p>
-----------------------	------	-------------------	---------	--------	---



tombre
y
chimene
a solar. -
Evapora
tivo:
técnicas
que
incluyan
partícula
s de
agua en
contacto
con la
ventilaci
ón
natural.
-
Radiativ
o.

Nan, X. et al.	2020	Hangzh ou, China	Experim ental	Sub- tropical húmedo	<p>Muros vivos modulares: técnica con una especie de vegetación, técnica con 10 especies diferentes, técnica con módulos con sustrato (sin vegetación)</p>	<p>*Temperatura media interior más alta por 0.4 °C que en el muro de referencia. *Temperatura interior mayor con 1 - 1.7 °C con el muro vivo con bambú y 0.6 - 1 °C más alta con</p>	<p>*Evaluar la técnica durante todo el año. *Condiciones de frío no se recomie nda dejar cámara de aire. *No resulta favorable su aplicación para período frío. *Las</p>	<p>*Evaluación solo en invierno. *Validación/comparativa con simulación</p>
-------------------	------	------------------------	------------------	----------------------------	---	--	--	---



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad académica de las Palmas

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

las 10 plantas especies de plantas. plantas influyen en el rendimiento térmico (a mayor altura y cobertura, mayor aislamiento, reducción de humedad, aumento de resistencia térmica, reducción de influencia del viento y aumento de temperatura en cámara de aire). *Elección adecuada de la orientación. *Incluir diferentes especies



de
plantas.

Pan, L. et al.	2020	Hong Kong, China	Experim ental	Sub- tropical húmedo	Fachad as verdes: plantas y sustrato	*F. elastica: tiene el mejor desempe ño en cobertur a de 78.1% . Mejor opción en reducció n de temperat ura con 0.6 °C a 4.6 °C y en capacida d de enfriami ento con 3.8 °C. *P. clavifor mis es la de *Las plantas con hojas pequeña s brindan mayor enfriami ento. *Evalua r los efectos del suelo en los sistemas verticale s verdes. *Futuro s estudios para evaluar los mecanis mos interacti
-------------------	------	------------------------	------------------	----------------------------	--	---



mayor vos
índice entre la
de área envuelve
foliar nte y los
(LAI). VGS. *
*C. Otro
variegat estudio
um y D. experim
repens etal
no son extenso
recomen de los
dadas VGS en
para la
clima envuelve
cálidos. nte de
*C. los
blumei edificios
y D. para
repens validaci
son las ón de
de datos
mayor utilizado
capacida s y
d de obtenido
almacen s en el
amiento estudio
de agua para el
ahorro
energéti
co.

Campos -Osorio et al.	2020	Mexical i, México	Experim ental	Cálido seco extremo so	Muro vivo	*Reduce 49% el flujo de calor conducti vo a través del muros, la carga térmica a 102.212	* Selecció n de vegetaci ón de acuerdo a las caracterí sticas climátic as de la ciudad de estudio	Lento crecimie nto de las planta debido a las condicio nes climátic as. * Para el análisis experim
-----------------------------	------	-------------------------	------------------	---------------------------------	----------------------	--	--	---



Btu/h al interior (plantas nativas). *Combinación de sombra do natural (edificac iones aladañas) con la técnica, así como otro tipo de vegetación natural y artificial

Sendra-Arranz et al.	2020	Madrid, España	Experim ental	Mediterr áneo	Muro verde	*Difere ncia de temperat ura superficial en verano hasta de 20 °C y 8 °C en invierno en el muro sur	*Aplica ción de la técnica en muro sur. *Uso de cámara de aire. *Selecci ón de plantas nativas.	Validaci ón de datos mediante simulaci ón y análisis de más variables (consumo energético)
----------------------	------	----------------	---------------	---------------	-------------------	---	---	--



Oquendo-Di Cosola, V. et al.	2020	Madrid, España	Simulación	N/A	Muro vivo: modular y panel con fieltro	*Fase de fabricación impacta 99% ambiente por las dos técnicas. *Fase de construcción: 0.2% de impacto ambiental al total. *El muro vivo con paneles de fieltro: 92.52% de impacto ambiental en fase de fabricación	*El muro vivo con paneles de fieltro: 92.52% de impacto ambiental en fase de fabricación	*Mediciones IN SITU. *Simulación para evaluar desempeño térmico y energético. *Evaluación de evaporación, sombreado, aislamiento acústico y fijación de partículas de polvo.
Shafiee, E. et al.	2020	Shiraz, Irán	Experimental y simulación	Cálido y semi-árido	Muros vivos	*Reduce la temperatura del aire hasta 8.7 °C., *Durante las horas de radiación	*Los muros vivos tienen un impacto favorable en la isla de calor urbano.	*Evaluación de un solo tipo de muro vivo. *Evaluación del desempeño térmico



					n solar, la temperat ura disminu ye una media de 2.59 °C	*Los benefici os se presenta n más para clima cálidos y durante el día	- energéti co al interior del edificio	
Hoffma nn, K.A. et al.	2021	Berlin, Alemani a y Liublian a, Esloveni a	Modelo numéric o	Contine ntal húmedo y Contine ntal	Fachad as verdes: muro verde indirect o	*Reduce la temperat ura de muro exterior 17 K e interior 2.9 K. *Ahorro s energéti cos entre 2 y 16 kWh/m2	*Consid erar la resistenc ia e inercia térmica para evaluar el potencia l de enfriami ento y el índice de área foliar (LAI)	*La validaci ón del modelo numéric o lo realizaro n un trabajo experim ental explicad o en otra investig ación. *La aplicaci ón de la técnica y el edificio de referenc ia fue el mismo muro, dividido a la mitad



Li, J. et al.	2021	Chenzhou, China	Experimental y simulación	Sub-tropical húmedo	Muros verdes: modular y lineal	*Muro verde modular : 73.42% de PET en rango de ligeramente frío, ligeramente caliente y confortable. Y 26.58% en condiciones extremas (muy frío, frío, muy caliente y caliente) . *Muro verde lineal: 68.22% de PET rango confortable y 31.78% en condiciones extremas. *Fachada verde:	Más estudios sobre el muro verde lineal y modular .	Evaluación de más variables ambientales y energéticas.
---------------	------	-----------------	---------------------------	---------------------	--	--	---	--



FAD
Facultad de
Arquitectura
y Diseño



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad de los Polígonos

MYDAUD
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA,
URBANISMO Y DISEÑO

60.06%
y
39.94%
de PET,
respecti
vamente
. *Muro
referenc
ia:
56.83%
y
43.17%
