



Entreciencias:  
Diálogos en la Sociedad  
del Conocimiento

# Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento

Año 12, Número 26, Artículo 20: 1-19. Enero - Diciembre 2024  
e-ISSN: 2007-8064



## Desempeño térmico de prototipo de techo verde bajo condiciones de calor extremo

## Thermal performance of a green roof prototype under extreme heat conditions

DOI: 10.22201/enesl.20078064e.2024.26.89127  
e25.89127

Génesis Anahí Cuevas Acuña <sup>a\*</sup>  
<https://orcid.org/0009-0002-2863-6599>  
Juan Pedro Ayala Moreno <sup>b\*</sup>  
<https://orcid.org/0000-0002-7708-4113>  
Javier Esquer Peralta <sup>c\*</sup>  
<https://orcid.org/0000-0002-3031-1104>  
Nora Elba Munguía Vega <sup>d\*</sup>  
<https://orcid.org/0000-0003-2352-3165>  
Juana Alvarado Ibarra <sup>e\*</sup>  
<https://orcid.org/0000-0003-3837-1694>

Fecha de recepción: 5 de julio de 2024.  
Fecha de aceptación: 16 de octubre de 2024.  
Fecha de publicación: 20 de noviembre de 2024.

<sup>a</sup> Autora de correspondencia  
[anage.cvs@gmail.com](mailto:anage.cvs@gmail.com)

<sup>\*</sup> Universidad de Sonora

Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación.  
CC-BY-NC-ND



## RESUMEN

**Propósito:** evaluar el desempeño térmico de un techo verde en un prototipo a escala en condiciones de calor extremo en clima cálido seco.

**Diseño metodológico:** el estudio es de carácter experimental y se desarrolló en cinco fases: revisión del estado del arte para elegir criterios de diseño de prototipos, diseño del prototipo base y del techo verde, construcción de los prototipos, medición de variables y análisis estadístico de los resultados.

**Resultados:** los resultados mostraron que el techo verde reduce significativamente la temperatura de bulbo seco promedio diaria interior, 4.03°C en promedio, estando dentro de la zona de confort térmico un 42.71 % del tiempo medido, mientras que el módulo base solo tuvo un 18.75 %. Se obtuvo un factor de decremento de 0.55 en el techo verde y 1.30 en el módulo base, así como un tiempo de retardo en alcanzar la temperatura máxima en la superficie interior de la losa de 4.86 horas para el techo verde y 1.16 para el módulo base.

**Limitaciones de la investigación:** los resultados obtenidos describen el comportamiento del prototipo bajo el calor extremo del verano, en futuros trabajos se deberá medir el comportamiento durante las cuatro estaciones.

**Hallazgos:** durante el tiempo de medición el prototipo verde mantuvo temperaturas más estables y menores comparadas con el módulo base, demostrando su eficacia para reducir la transferencia de calor y mejorar el confort térmico bajo condiciones de calor extremo en clima cálido seco.

*Palabras clave: techo verde, prototipo, sustentabilidad, confort térmico, factor de decremento*

## ABSTRACT

**Purpose:** To evaluate the thermal performance of a green roof in a scale prototype under extreme heat conditions in a dry hot climate.

**Methodological design:** The study is experimental and was developed in five phases: A state of the art review to choose prototype design criteria, design of the base prototype and green roof, construction of the prototypes, measurement of variables, and statistical analysis of the results.

**Results:** The results demonstrated that the green roof significantly reduced the average daily indoor dry bulb temperature, 4.03°C on average, being within the thermal comfort zone 42.71 % of the measured time, in contrast to 18.75 % for base module. A decrease factor of 0.55 was obtained in the green roof and 1.30 in the base module, as well as a delay in reaching the maximum temperature on the interior surface of the slab of 4.86 hours for the green roof and 1.16 for the base module.

**Research Limitations:** The results obtained describe the behavior of the prototype under the extreme heat of summer; in future studies, measurements should be taken throughout the four seasons.

**Findings:** During the measured time, the green prototype maintained more stable and lower temperatures compared to the base module, demonstrating its effectiveness in reducing heat transfer and improving thermal comfort under extreme heat conditions in hot dry climates.

*Keywords: green roof, prototype, sustainability, thermal comfort, decrement factor*

## INTRODUCCIÓN

Las ciudades son centros vitales para el crecimiento económico ya que contribuyen a cerca del 60 % del PIB mundial, pero al mismo tiempo, representan alrededor del 75 % de las emisiones de carbono, el 60 % del uso de recursos y entre el 70-80 % del consumo de energía a nivel global ([Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo \[PNUD\], 2022](#)). El Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos ([UN-Habitat, 2022](#)), en su Informe Mundial de Ciudades 2022, estima que en el 2021 el 56 % de la población mundial se concentraba en zonas urbanas y que este porcentaje aumentará al 68% para el 2050. En consecuencia, dicho crecimiento acelerado genera una serie de desafíos urbanos para el desarrollo sustentable de las ciudades ([Shen et al., 2017](#)).

Aunado a la alta concentración de personas, otros factores que dificultan el desarrollo sustentable urbano son la ubicación geográfica, las condiciones climáticas de la zona, el sector socioeconómico y la calidad de las edificaciones, lo cual puede incrementar la vulnerabilidad hacia el cambio climático y los desastres naturales ([Novillo, 2018](#); [Duque y Montoya, 2021](#)). Una de las consecuencias que ha generado dicha vulnerabilidad es conocida como el efecto de *isla de calor urbano*, el cual se puede definir como el aumento de la temperatura ambiental urbana resultado del almacenamiento de energía durante el día por la absorción de radiación solar en las superficies artificiales tales como edificaciones, estructuras de concreto y pavimento ([Marincic, 2022](#)).

La isla de calor urbano tiene repercusiones directas en la economía debido al aumento en la demanda de sistemas de enfriamiento como aires acondicionados, y un excesivo consumo energético en las edificaciones ([Garnica, 2020](#)); en el ambiente, debido a la modificación de las propiedades de las superficies naturales aumentando la absorción de la radiación solar y disminuyendo la capacidad de evaporación y enfriamiento nocturno ([Gunawardena et al., 2017](#)), y también tiene repercusiones directas en el confort, la salud humana y en la calidad de vida al incrementar la temperatura urbana y los golpes de calor ([Cuadrat et al., 2022](#)).

Con base en lo anterior, se ha estudiado la eficiencia de varias estrategias para la reducción de las altas temperaturas tales como: la adecuada morfología de los es-

pacios abiertos ([Arellano y Roca, 2018](#)), cuerpos de agua ([Yang et al., 2022](#)), superficies con mayor albedo ([Önder y Akay, 2014](#)), el uso de elementos de sombreado tal como pérgolas que reducen la radiación solar hacia las superficies ([Graça et al., 2022](#)), materiales y sistemas que minimicen el impacto térmico al interior de los espacios ([Borràs et al., 2022](#); [Chihab et al., 2022](#)), fachadas verdes ([Suárez et al., 2020](#)) y estrategias sustentables en azoteas, tal como la doble cubierta ventilada ([Kumar et al., 2021](#)).

Asimismo, los techos verdes han demostrado ser un método eficiente en la reducción de la temperatura interior y el consumo energético ([Khotbehsara et al., 2019](#)), en contribuir a la economía local y global ([Green et al., 2016](#)), y en mejorar la salud física y mental de las personas elevando la calidad de vida urbana ([Allen et al., 2018](#); [Delgado, 2018](#)). Un techo verde es cualquier elemento vegetal colocado parcial o totalmente sobre la azotea ([Jim, 2017](#)) y se compone de cinco principales componentes: membrana impermeabilizante, elemento drenante, elemento filtrante, sustrato de suelo y cobertura vegetal ([dos Santos et al., 2019](#); [Feitosa y Wilkinson, 2020](#)).

Dentro de las investigaciones en sustentabilidad se han estudiado diversas variaciones en los diseños de los techos verdes con el fin de mejorar su rendimiento conforme a las condiciones específicas del proyecto, tal es el caso realizado por [La Roche et al. \(2020\)](#) donde incorporan un techo verde con el sistema de ventilación nocturna y sistema de irrigación. [Broekhuizen et al., \(2021\)](#) estudiaron cuatro diferentes modelos hidrológicos en techos verdes para establecer el mejor control de agua pluvial. [Sheng et al. \(2011\)](#) trabajaron con la integración del techo verde, la recolección de agua pluvial y un sistema fotovoltaico. Aunado a esto, la tabla 1 muestra estudios que se han realizado en la búsqueda del mejoramiento de confort térmico mediante techos verdes.

Tabla 1. Estudios del techo verde para el mejoramiento del comportamiento térmico

Referencia	CcK	Estudio	Resultados
Aboelata, 2021.	BWh	Evaluar el efecto de los techos verdes en la reducción de la temperatura del aire exterior y la demanda de enfriamiento de los edificios dentro de la zona urbana.	Los techos verdes extensivos demostraron reducir la temperatura del aire de 0.1-1.7 K y la energía para enfriamiento de 3.2-13.3%.
Bevilacqua et al., 2020.	Csa	Simulación dinámica mediante el software TRNSYS para el estudio de temperaturas en un techo verde experimental con modelo aislado y no aislado.	Mejoramiento del confort térmico interior en el invierno de 2 kW y una reducción de demanda energética en calefacción de 28.2%.
Cai et al., 2019.	Cfa	Investigación experimental y un análisis de simulación numérica en el ahorro energético y beneficios ecológicos de los techos verdes durante el invierno y el verano.	La simulación del consumo energético estimó que los techos verdes por metro cuadrado ahorran 11.53 kWh por año.
dos Santos et al., 2019.	BSk	Estudio de la mitigación del confort térmico y escasez de agua mediante un techo verde.	Se obtuvo que en promedio se reduce hasta 0.8 °C al interior del espacio con techo verde.
He et al., 2020.	Cfa	Comparación del comportamiento térmico de un techo verde, un techo frío y un techo común en verano e invierno y una simulación con el software THERB.	En verano el techo frío tuvo una reducción de 3.3°C contra 2.9°C del techo verde, sin embargo, en invierno el techo verde tuvo un promedio de 3.3°C.
Krebs y Johansson, 2021.	Cfa	Comparación de dos techos verdes bajo dos microclimas distintos mediante la simulación en ENVI-met y Energy Plus para calcular el confort térmico al interior de los espacios.	La reducción de temperatura sin ningún tipo de sombra fue de 2.8 °C, sin embargo, con sombreado de árboles fue de 4.3°C.
Mungur et al., 2020.	Aw	Evaluar el efecto del techo verde sobre las fluctuaciones de la temperatura interior, los flujos de calor conductivo y la temperatura interior máxima diaria.	El flujo de calor máximo al día en techo normal varió de 0.4797 - 2.5190 W/m <sup>2</sup> mientras que, para el techo verde, varió de 0.2090 - 0.5312 W/m <sup>2</sup> .

Fuente: elaboración propia.

Notas: CcK-Clasificación climática Köpen, BWh-árido cálido, Csa-Templado mediterráneo cálido, Cfa-Templado húmedo cálido, BSk-Semiárido frío, Aw-Tropical sabana.

En el presente documento se plasma un estudio de campo donde se analiza el comportamiento de la temperatura bulbo seco, temperatura de superficies de losa y humedad relativa al interior de un prototipo de techo verde en comparación de un módulo base. Los prototipos se localizan en la azotea de una vivienda de un nivel ubicada en Hermosillo, Sonora, la cual es una ciudad con un clima cálido seco (BWh) de acuerdo con la clasificación climática de Köppen, el cual se caracteriza por tener una intensa radiación solar, temperaturas extremadamente altas en verano y escasas precipitaciones (López, 2020). Los prototipos se pusieron a prueba en los días del año con temperaturas más altas, con una temperatura promedio máxima ambiente medida durante el experimento de 42°C.

## DISEÑO METODOLÓGICO

Este estudio se desarrolló siguiendo las cinco fases que se muestran en la figura 1, con base en las investigaciones desarrolladas por Ma'bdeh et al. (2022), Abdalazeem et al. (2024), la Roche et al., (2020). Primeramente, en la *fase uno* se investigó el estado del arte de techos verdes estudiados por medio de prototipos y simulaciones en los últimos 10 años en climas cálidos, donde se resumieron datos geográficos, datos de medición y características principales de los prototipos. En la *fase dos*, con base en la comparativa del estado del arte y bajo criterio de las características de la zona de estudio, se definió el diseño del prototipo: dimensiones, componentes y materiales, junto con las especificaciones del diseño del método experimental: tipo, cantidad, ubicación y programación de los sensores para la medición de variables. Durante la *fase tres* se construyeron los módulos y el techo verde en el lugar de estudio, aunado a esto, se programaron y



se colocaron los sensores seleccionados y se realizaron pruebas para la verificación de su correcta instalación. Durante la *fase cuatro* se recolectaron los datos de las variables del 1 al 11 y del 13 al 25 de junio del 2023. Finalmente, en la *fase cinco* se analizaron los datos obtenidos con respecto al comportamiento térmico del prototipo de techo verde en comparación con el módulo base.

**Figura 1. Esquema de la metodología desarrollada en este documento**



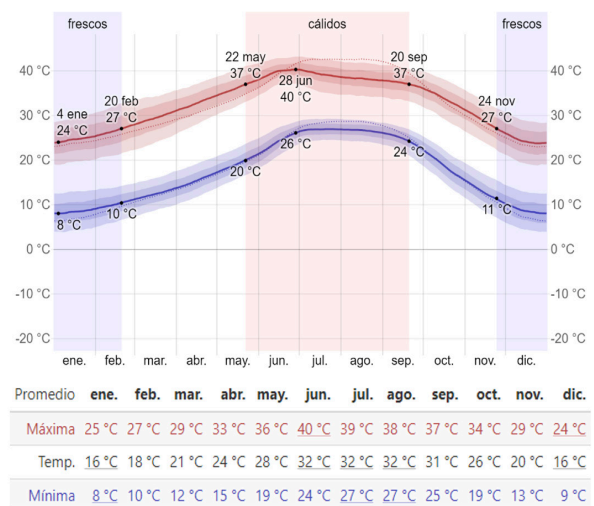
Fuente: elaboración propia.

Nota: MB-Módulo base, PV- Prototipo verde

## Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Hermosillo, Sonora, donde hay un clima cálido seco (BWh) y tiene la característica de presentar altas temperaturas en verano, tal como se muestra en la figura 2, la temporada de altas temperaturas dura aproximadamente cuatro meses: del 22 de mayo al 20 de septiembre y la temperatura máxima promedio diaria es de más de 37°C.

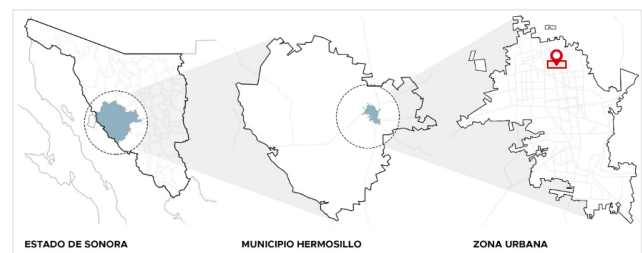
**Figura 2. Temperatura máxima y mínima promedio de Hermosillo**



Fuente: WeatherSpark (2024).

Los prototipos se localizan en la azotea del primer nivel de una vivienda ubicada al norte de la zona urbana como lo muestra la figura 3, con coordenadas 29° 8' 24.65" N, 110° 58' 46.70" O. Se construyeron y armaron en el sitio de estudio, donde se colocaron de manera estratégica para que recibieran la misma cantidad de radiación solar durante el día sin tener obstáculos que proyectaran sombra sobre ellos.

**Figura 3. Ubicación de la zona de estudio**



Fuente: elaboración propia.

## Diseño experimental y construcción de prototipos

Se realizó una investigación del estado del arte y se elaboró una tabla comparativa de aquellas investigaciones que utilizaron módulos de prueba para estudiar el techo verde en lugares con climas cálidos y áridos. Se recopiló y resumió la información sobre sus componentes, las variables medidas y los instrumentos utilizados, junto con las dimensiones de estos y los materiales utilizados.

En la tabla 2 se puede observar que las variables medidas por la mayoría de las investigaciones son la temperatura y la humedad relativa mediante termopares y sensores. La altura promedio de los módulos es alrededor de 0.50 m de altura y la mayoría realizó la investigación sobre losas de concreto y muros con aislante térmico.

**Tabla 2. Investigaciones de prototipos de techo verde en climas cálidos**

Referencia	Prototipo	Variable	Instrumento	Medidas	Materiales
Sahagun, 2019	Techo verde desértico.	Promedio T máx, media y min interior y del ambiente.	Termopar Onset Hobo con precisión de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ sensores tipo TMC6-HD.	1.81 m x 1.81 m x 0.16 m	Losa 5 cm de concreto armado, muro hoja de yeso, poste metálico y placa de poliestireno pintado blanco.
Alvarado et al., 2017	Cubierta Ecológica.	Temperatura y humedad relativa.	Dickson TH800.	0.50 m x 0.50 m x 0.30 m	Losa de concreto $f'c=200$ kg/cm <sup>2</sup> y muros de madera de 1 pulgada espesor.
García, 2021	Cuatro techos verdes extensivos.	Temperatura y humedad relativa.	Elitech RC-51H PDF USB.	1.00 m x 1.00 m x 0.30 m	Losa de concreto.
Wang et al., 2017	Techo verde con sistema de riego.	Temperatura, riego y termografía infrarroja.	Termopar y software Elitech Elitech RC-4 y cámara infrarroja YRH600	1.00 m x 0.65 m x 0.30 m	Losa de concreto reforzado de 12.50 mm, muros con marco de polipropileno con 220 mm de profundidad.
La Roche y Berardi, 2014	Cuatro techos verde con aislamiento.	Temperatura.	Sensors Onset Thermistors precisión $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	1.20 m x 1.20 m x 1.20 m	Losa de concreto de 3.8 cm, muros panel de yeso y madera contrachapada 5 cm de espesor y pintura blanca.
Rodríguez, 2017	Doble cubierta ventilada.	Temperatura y humedad relativa.	3 data loggers tipo USB marca Ampere modelo EL-USB-2	0.80 m x 0.80 m x 0.47 m	Losa de concreto armado 12 cm espesor y muros de MDF 9 mm, placas de 5 cm de poliestireno y pintado de blanco.
Jiang y Tang, 2017	Techo verde extensivo y ventilación Natural.	Temperatura ambiental, suelo, humedad relativa y radiación solar.	Termopar tipo T, Sensor solar Onset S-LIB-M003, Sensor AP471 S2	1.30 m x 1.0 m x 0.90 m	Losa de concreto 15 cm espesor, muros de ladrillo 24 x 11.5 x 5 cm con aislamiento de polietileno.

Fuente: elaboración propia.

### Módulo base

Se diseñaron y construyeron dos módulos con las mismas características para poder comparar el comportamiento térmico de un módulo con techo verde y otro sin techo verde, tal como se observa en la figura 4. Ambos tienen una dimensión de 0.60 m de ancho, 0.74 m de largo y 0.50 m de altura, con una losa de concreto  $f'c=200$  kg/cm<sup>2</sup>, reforzado con malla electrosoldada de 15 cm en ambos sentidos, con dimensión de 0.50 m x 0.60 x 0.07 m de espesor la cual se coló en sitio y se colocó sobre los barrotes de la estructura interna. Los muros son a base de poliestireno expandido de 6 cm de espesor, unidos

en las esquinas a barrotes de madera de 5 cm x 5 cm, mediante silicón frío, para soportar la losa de concreto, se colocaron placas de MDF de 3 mm al exterior para evitar la transferencia de calor y proveer de aislamiento contra fenómenos naturales exteriores, sobre este se le aplicó impermeabilizante acrílico a los muros y la losa para impedir la filtración de agua y humedad al interior de los módulos. En la base se colocó una placa de poliestireno expandido de 3 cm de espesor para evitar la transferencia de calor con la azotea de la edificación.

**Figura 4. Construcción en sitio de los módulos base**



Fuente: elaboración propia.

### Techo verde

Se procedió a construir el prototipo de techo verde sobre uno de los módulos, como lo muestra la figura 5, donde se utilizaron dos jabas de plástico de 30 cm de ancho x 50 cm de largo de base. Para la capa filtrante se utilizó malla geotextil dejando fluir el excedente de agua evitando que el sustrato salga por los huecos de las jabas. El sustrato utilizado es a base de humus de lombriz, composta case-ra y tierra orgánica para un mejor desarrollo de la flora, con un espesor de 10 cm ya que es la característica de un techo verde extensivo donde la flora seleccionada se pueda desarrollar óptimamente. Se escogió utilizar una planta del género *kalanchoe* conocida también comúnmente como mala madre, por las propiedades que posee adecuadas a las condiciones climáticas de la región,

requiere poca agua y poco mantenimiento, lo que la hace un excelente elemento para los techos verdes en climas cálidos. Se decidió hacer un riego manual de 1 litro de agua al día a las 19:00 horas.

**Figura 5. Construcción del prototipo de techo verde**



Fuente: elaboración propia.

### Dispositivos de medición

Las variables que se midieron son la temperatura de superficie, temperatura de bulbo seco, humedad relativa mediante distintos sensores desglosados en la tabla 3, donde se puede observar su resolución y precisión.

**Tabla 3. Características de los instrumentos de medición**

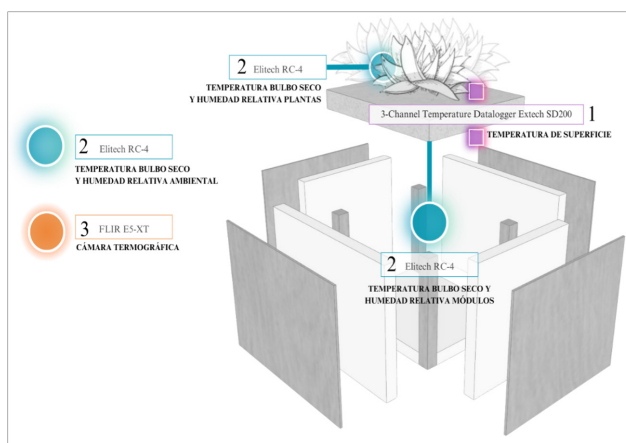
	Variable	Sensor	Resolución	Precisión
1	Temperatura superficie	3-Channel Temperature Datalogger Extech SD200	0.1 ° C	± (0.5% + 0.5°C)
2	Temperatura bulbo seco Humedad relativa	Elitech RC-4	0.1 ° C	± (0.5% + 0.5°C)
3	Temperatura de objetos	Cámara termográfica FLIR E5-XT	NA	±2 °C

Fuente: elaboración propia.

En la figura 6 se muestra dónde se colocaron los sensores. Para medir la temperatura de superficie de la losa, se colocó un sensor 3-Channel Temperature Datalogger Extech SD200 en el lecho inferior y otro en el lecho exterior de la losa. Para la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa se utilizaron sensores Elitech RC-4,

los cuales se colocaron colgados a 15 cm de la losa al interior de cada prototipo, otro se colocó a la intemperie bajo sombra para conocer la temperatura ambiente y un cuarto sensor se colocó entre las plantas para tener la comparación de esos cuatro escenarios y poder comparar su comportamiento térmico. Las fotos termográficas se tomaron de manera manual desde el exterior.

**Figura 6. Ubicación de los sensores**



Fuente: elaboración propia.

### Medición de variables

Las mediciones se tomaron a cada 10 minutos, los cuales después se promediaron por hora, estas se realizaron en dos etapas: del 01 al 11 y del 13 al 25 de junio del 2023. Estas fechas son días completos de 24 horas por lo que el inicio de las mediciones se realizó el 31 de mayo hasta el 12 de junio en la primera etapa y del 12 de junio al 26 de junio del mismo año. Dos veces al día se realizaban chequeos de que los sensores estuvieran recopilando datos y tuvieran la misma cantidad de mediciones. Durante el periodo del 01 al 11 de junio, a las 15:00 horas, se tomaron dos fotografías con la Cámara FLIR E5-XT, la cual con la termografía infrarroja detecta la radiación infrarroja emitida por los objetos y la convierte en una imagen térmica visible mostrando las variaciones de temperatura en diferentes colores, las áreas más calientes en colores cálidos y las áreas frías en colores fríos como el azul.



## RESULTADOS

Tabla 4. Abreviaturas utilizadas

Abreviatura	Significado
AE-BS-Prom	Promedio de temperatura bulbo seco de ambiente exterior
MB-BS-Prom	Promedio de temperatura bulbo seco del módulo base
MB-SI-Prom	Promedio de temperatura superficie interior de losa del módulo base
MB-SE-Prom	Promedio de temperatura superficie exterior de losa del módulo base
PV-BS-Prom	Promedio de temperatura bulbo seco del prototipo verde
PV-SI-Prom	Promedio de temperatura superficie interior de losa del prototipo verde
PV-SE-Prom	Promedio de temperatura superficie exterior de losa del prototipo verde
AP-BS-Prom	Promedio de temperatura bulbo seco del área plantas
AE-HR-Prom	Promedio humedad relativa de ambiente exterior
MB-HR-Prom	Promedio humedad relativa del módulo base
PV-HR-Prom	Promedio humedad relativa del prototipo verde
HSCT-MB	Horas sin confort térmico módulo base
HSCT-PV	Horas sin confort térmico prototipo verde
TSI-MB-Max	Temperatura superficie interior losa máxima del módulo base
TSI-PV-Max	Temperatura superficie interior losa máxima del prototipo verde
TAE-MAX	Temperatura ambiente exterior máxima

Fuente: elaboración propia.

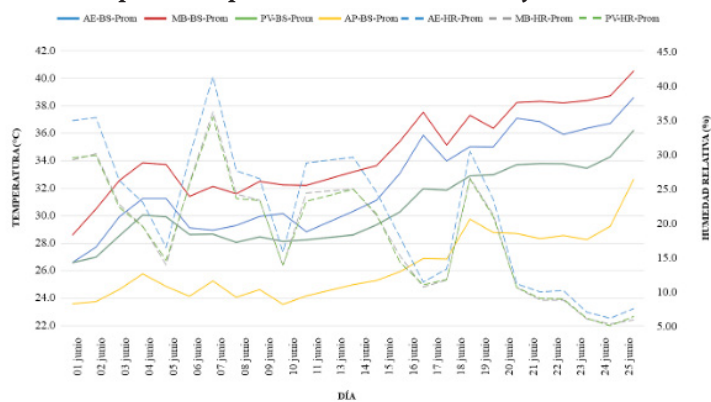
### Temperatura Bulbo seco y humedad relativa

Los sensores Elitech RC-4 registraron mediciones a cada 10 minutos, sumando 3,456 mediciones por sensor. Para un mejor análisis del comportamiento general, se calcularon los promedios diarios de temperatura y humedad relativa de cada sensor, estos datos se presentan de manera concisa en la figura 7, donde se observa el comportamiento del promedio diario de la temperatura bulbo seco y la humedad relativa dentro del módulo base y del prototipo verde, así como debajo de las plantas y las condiciones ambientales exteriores. Además, se observa que la temperatura dentro del módulo base es superior a la temperatura ambiente, indicando una acumulación

de calor que no se disipa adecuadamente. Aunado a esto, se observa un decremento en la humedad relativa los últimos siete días de mediciones, lo cual concuerda con el aumento de la temperatura registrada. Los promedios diarios de temperatura de bulbo seco del módulo base y el prototipo verde fueron sometidos a ANOVA y una prueba *t* de *student* resultando una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los dos grupos de datos a  $p < 0.05$ .

Se obtuvo una diferencia de hasta 5°C entre el módulo base y el prototipo con techo verde en el promedio diario, el cual concuerda con la investigación realizada por

Figura 7. Temperatura promedio de bulbo seco y humedad relativa



Fuente: elaboración propia.



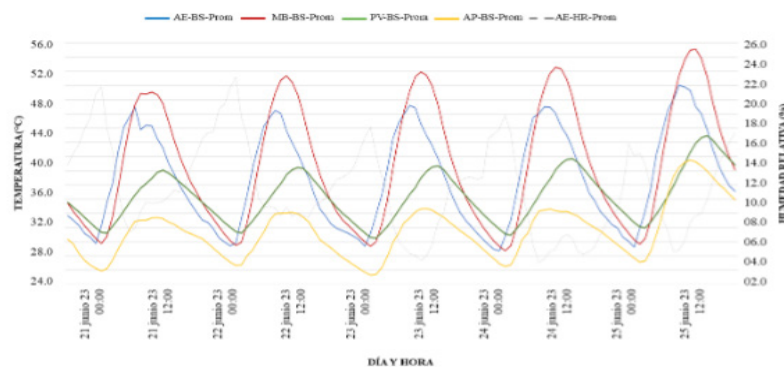
Jiang y Tang (2017), donde obtuvo una disminución de 5.7°C al estudiar techos verdes extensivos con ventilación nocturna mecánica y 5.0°C con ventilación natural en comparación a su prototipo de prueba y al resultado obtenido por He *et al.* (2016), donde obtuvo hasta una disminución de 5°C en el interior del techo verde. Sin embargo, este resultado es mucho mayor a la conclusión realizada por Jamei *et al.* (2023) donde en su trabajo de investigación de la literatura de techos verdes, destacan una reducción de 2.5°C de temperatura interior mediante la implementación de techos verdes extensivos que fue el aplicado en esta investigación.

Para una mayor apreciación de los cambios de temperatura y humedad relativa durante las 24 horas del día, se realizó la gráfica de la figura 8, donde se representa el

comportamiento de temperatura de bulbo seco durante cinco días, del 21 al 25 de junio, allí se observa como el comportamiento al interior del prototipo verde mantiene un rango entre 28°C y 42°C como máxima, mientras que el módulo base alcanzó mínimas de 26°C, pero con máximas de 55°C.

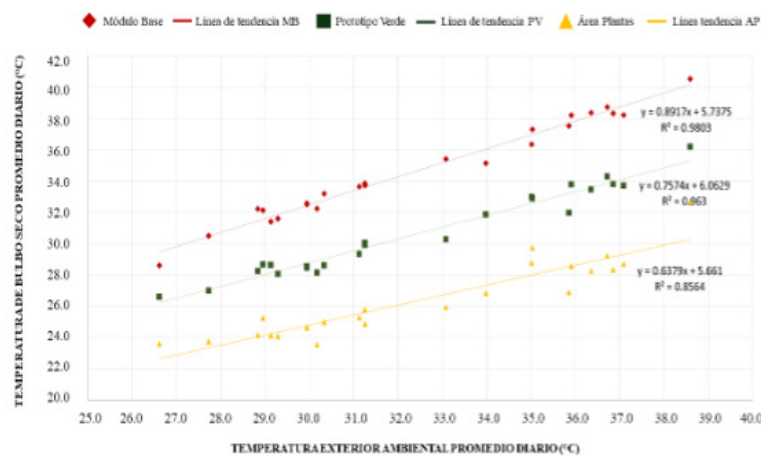
Se realizó un gráfico de dispersión para mostrar la relación entre la temperatura exterior ambiental promedio diaria y la temperatura al interior promedio diaria de los dos prototipos. La figura 9 presenta una correlación fuerte entre las variables dependiente e independiente, donde el coeficiente de correlación más fuerte es de 0.9803 del módulo base con respecto a la temperatura ambiental, seguido por el prototipo verde con un coeficiente de 0.963 y entre plantas de 0.8564. Se observa que

Figura 8. Promedios horarios de temperatura de bulbo seco y humedad relativa



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Gráfico de dispersión de temperatura de bulbo seco



Fuente: elaboración propia.

las pendientes presentan un comportamiento similar, sin embargo, la pendiente es mayor en el módulo base en comparación con el prototipo verde. Esto sugiere que las variaciones de la temperatura exterior promedio diaria influyen de manera similar en las variaciones de la temperatura interior de los dos prototipos.

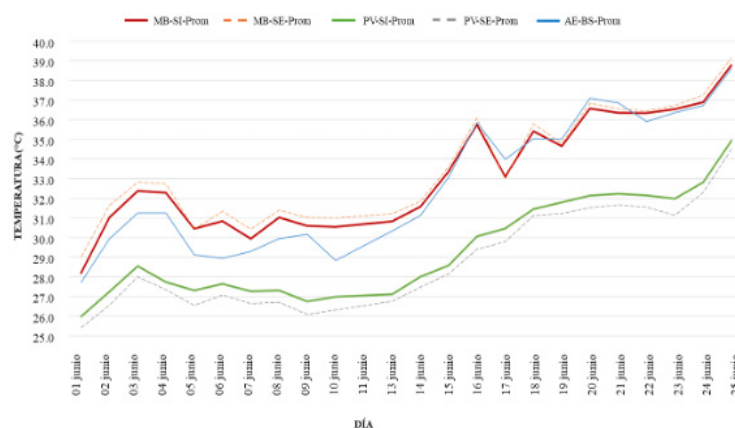
## Temperatura de superficies

En la figura 10 se observan los promedios diarios de la temperatura de superficie de la losa medidos por los sensores 3-Channel Temperature Datalogger Extech SD200, junto con la temperatura ambiental externa. En donde se puede observar una significativa diferencia en el comportamiento térmico entre el módulo base y el prototipo

verde, obteniendo hasta 4 °C menos de diferencia entre ambos, añadiendo que el módulo base tuvo un comportamiento térmico similar a la temperatura ambiental externa. Los promedios diarios de temperatura de superficie de la losa del módulo base y el prototipo verde fueron sometidos a ANOVA y una prueba *t* de *student* resultando una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los dos grupos de datos a  $p < 0.05$ .

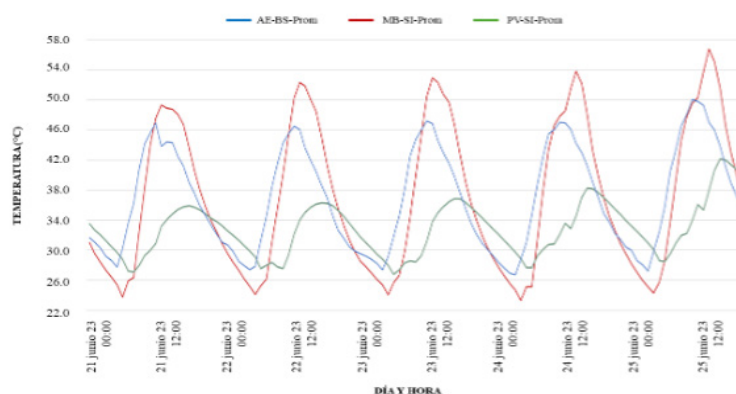
Con el fin de profundizar en el análisis de las fluctuaciones de temperatura, se ha elaborado la figura 11 que presenta el comportamiento térmico de las dos losas en su interior, contrastándolo con la temperatura ambiente exterior durante un periodo de cinco días, del 21 al 25 de junio. Esta representación visual revela que el techo verde logra reducir significativamente la temperatura de la superficie en comparación con el entorno exterior.

Figura 10. Promedios diarios de temperatura de superficie interior losa



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Promedios diarios de temperatura de superficie interior losa



Fuente: elaboración propia.

Además, se aprecia un marcado descenso en relación con la temperatura registrada en el interior de la losa del módulo base, lo que indica menor acumulación de calor al interior y, por ende, un mayor nivel de confort térmico. Resaltando que durante el horario nocturno se obtuvo una menor temperatura al interior del módulo base en comparación al prototipo verde, este comportamiento también se observa en los resultados obtenidos por [García \(2021\)](#), lo que sustenta la capacidad del techo verde para mantener la temperatura interior dentro de un rango de confort.

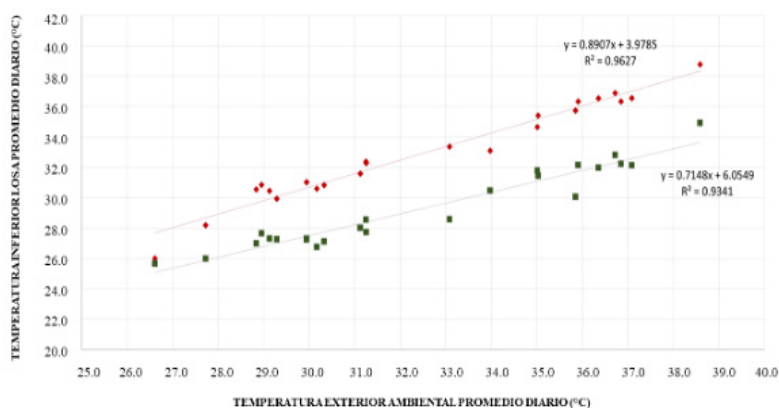
Al igual que en el caso de la temperatura ambiente, se ha elaborado un gráfico de dispersión para explorar la relación entre la temperatura ambiental externa promedio diaria y la temperatura inferior promedio diaria de las dos losas. En la figura 12 se presentan las líneas de tendencia junto con los coeficientes de correlación

correspondientes, y aunque los coeficientes son inferiores a los de la temperatura de bulbo seco, aún indican una correlación fuerte entre las variables dependiente e independiente. En detalle, se observa un coeficiente de correlación de 0.9627 para el módulo base y de 0.9341 para el prototipo verde, lo que sugiere una relación significativa entre la temperatura ambiental exterior y la temperatura en el interior de las losas.

### Resultados generales de temperatura y humedad relativa

A partir de los resultados obtenidos, se ha generado la tabla 5 para resumir el comportamiento tanto del módulo base como del prototipo verde en relación con el ambiente externo. En esta tabla, se destaca una mayor

Figura 12. Gráfico de dispersión temperatura inferior losa



Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Resumen de datos obtenidos

Análisis estadístico	AE	MB-BS	MB-SI	MB-SE	PV-BS	PV-SI	PV-SE
Temperatura promedio (°C)	32.46	34.68	32.84	33.01	30.65	29.26	28.68
Desviación estándar de temperatura prom.	3.49	3.15	3.29	3.43	2.69	2.59	2.61
Temperatura prom. de las mínimas (°C)	24.02	24.13	20.94	20.67	25.84	23.81	24.14
Temperatura prom. de las máximas (°C)	41.99	47.47	48.34	49.81	35.74	34.18	32.78
Humedad relativa promedio (%)	23.28	20.71	-	-	20.61	-	-
Humedad relativa prom. de las mín. (%)	11.36	10.91	-	-	10.59	-	-
Humedad relativa prom. de las máx. (%)	41.06	34.99	-	-	35.83	-	-
Factor de decremento temperatura prom.	-	1.30	1.53	-	0.55	0.58	-
Tiempo de retardo de temperatura máx. (h)	-	1.83	1.16	-	4.16	4.86	-

Fuente: elaboración propia.

estabilidad en la desviación estándar de la temperatura promedio del prototipo verde en comparación con el módulo base.

#### *Temperatura promedio de las mínimas y de las máximas*

Se observa que el prototipo con techo verde registra una temperatura promedio de las máximas más baja que el módulo base, lo que indica una menor transferencia de calor hacia el interior del prototipo verde resultando en mayor estabilidad de las temperaturas internas. Sin embargo, también se aprecia un promedio de las temperaturas mínimas más elevado en el prototipo verde, lo que sugiere que el techo verde impide el enfriamiento radiactivo nocturno, es decir, cuando se tienen cielos despejados, el techo verde impide a la losa de concreto radiar hacia el cielo. Estos hallazgos reflejan la efectividad del techo verde para regular la temperatura interna, tener rangos más estables y reducir la transferencia de calor en comparación con el módulo base.

#### *Humedad relativa promedio de las mínimas y de las máximas*

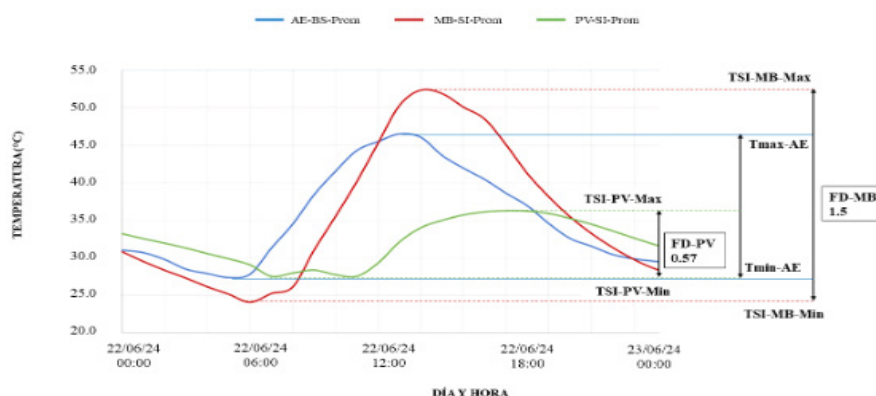
Los promedios de las mínimas obtenidos de la humedad relativa fueron muy similares entre el ambiente externo, dentro del módulo base y dentro del prototipo verde, lo que es representante del clima cálido seco donde se ubi-

ca el estudio. Por otro lado, el ambiente externo presentó variaciones más amplias de humedad relativa, con un pico máximo significativamente más alto que el módulo base y el prototipo verde, los cuales mostraron humedades máximas cercanas entre sí, con el prototipo verde ligeramente superior. Estas observaciones sugieren que componentes de los prototipos moderan las variaciones de la humedad relativa del exterior, siendo el techo verde una opción efectiva para mantener un nivel de humedad más estable.

#### *Factor de decremento de temperatura promedio*

El factor de decremento (FD) de las temperaturas promedio se calcula mediante la diferencia entre la temperatura máxima (Tmax) y la temperatura mínima (Tmin) dividida por la diferencia entre la temperatura máxima ambiental (TmaxAE) y la temperatura mínima ambiental (TminAE) diaria (1), este factor proporciona una medida de cómo varían las temperaturas con el tiempo (Kontoleon y Bikas, 2007). Como se muestra en la figura 13, el módulo base, con un FD de 1.3 en comparación con el valor de 0.55 del prototipo verde, indica que la temperatura dentro del módulo base se ajusta más rápidamente a los cambios en la temperatura ambiente, mientras que el prototipo verde muestra un ajuste más lento. Resultando en temperaturas mínimas interiores ligeramente mayores que las mínimas exteriores, y tem-

**Figura 13. Factor de decremento en temperatura superficie interior promedio diario**



Fuente: elaboración propia.



peraturas máximas interiores significativamente inferiores a las máximas exteriores, lo que se puede observar en la investigación realizada por [La Roche y Berardi \(2014\)](#), donde concluye que el aislamiento que provee el techo verde limitó las fluctuaciones de temperatura durante la noche, obteniendo una temperatura de 2°C más cálido.

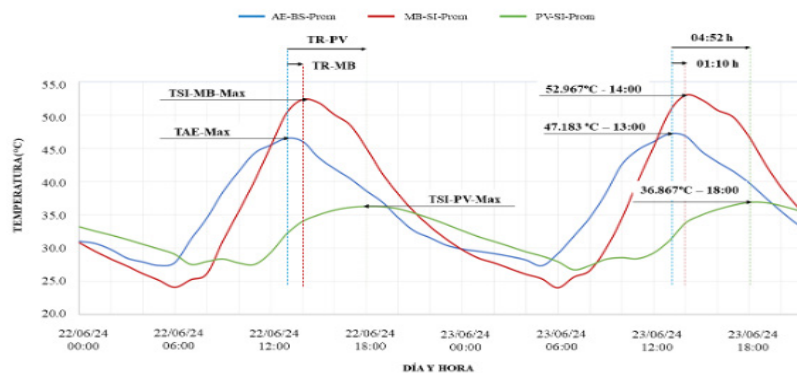
$$\text{Factor de decremento} = (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) / (T_{\text{maxAE}} - T_{\text{minAE}}) \quad (1)$$

#### Tiempo de retardo de temperatura máxima

Además, se calculó el tiempo de retardo para alcanzar la temperatura máxima promedio en horas. Se observó que el módulo base tarda aproximadamente 1.83 horas

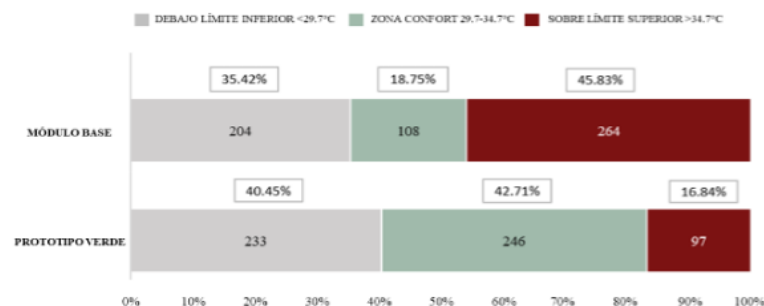
en alcanzar su temperatura bulbo seco interior máxima en comparación con la temperatura máxima ambiental externa registrada. En contraste, el techo verde presenta un tiempo de retardo de aproximadamente 4.16 horas para alcanzar su punto máximo. Con respecto a las temperaturas superficiales de la losa, como se muestra en la figura 14, se obtuvo una temperatura máxima en la superficie interior de la losa del módulo base cerca de las 13:00 con un retardo de 1.16 horas, mientras que, en la superficie interior de la losa del prototipo verde, la temperatura máxima sucedió alrededor de 17:00 con un tiempo de retardo de 4.86 horas. Lo que representa una diferencia en el comportamiento térmico, ampliando el rango de confort térmico dentro del prototipo verde. Este resultado se puede comparar con los obtenidos por [Rodríguez \(2017\)](#) donde obtuvo la temperatura promedio máxima de la superficie interior con techo verde a las 17:00 horas.

Figura 14. Tiempo de retardo temperatura superficie interior máxima



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Horas en límite de confort térmico de los prototipos



Fuente: elaboración propia.

## Confort térmico

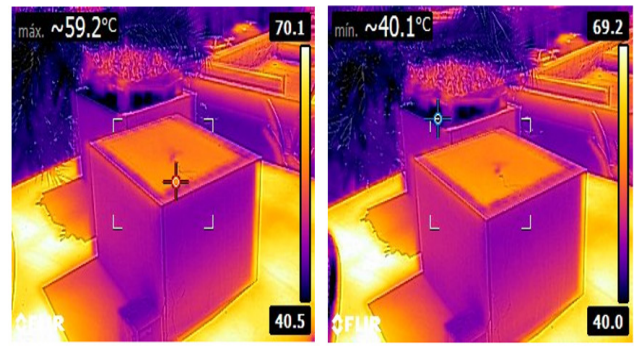
Para definir los límites de la zona de confort térmico, se utilizó la investigación de [Marincic \(2012\)](#), en la cual establece para la ciudad de Hermosillo, Sonora, una temperatura de neutralidad de 32.2°C y un rango de confort térmico de 29.7°C para el límite inferior y 34.7°C para el límite superior durante el verano. A partir de los 576 promedios horarios obtenidos por hora de la temperatura de bulbo seco en los prototipos, se elaboró el gráfico de la figura 15 para representar los resultados obtenidos en el módulo base y el prototipo verde en términos de horas dentro del rango de confort térmico.

Se observó que el módulo base registró un 18.75 % de tiempo dentro del rango, mientras que un 35.42 % estuvo por debajo y un 45.83 % por encima de este rango. En contraste, el prototipo verde demostró tener un 42.71 % de tiempo dentro del rango de confort térmico, un 40.45 % por debajo de este y un 16.84 % por encima del límite superior. Estos resultados evidencian la capacidad del techo verde para mejorar el confort térmico de una edificación en una ciudad con clima cálido y seco, incluso en temporadas con temperaturas máximas por encima de los 40°C.

## Cámara Termográfica

Se ha incluido la figura 16, que muestra dos imágenes capturadas con una cámara termográfica FLIR E5-Xt. En la primera imagen, el foco con la temperatura máxima se sitúa sobre la losa del módulo base, registrando una temperatura de 59.2°C. En la segunda imagen, el foco con la temperatura mínima se encuentra debajo del prototipo de techo verde, con una temperatura de 40.1°C. Estas fotografías fueron tomadas a las 15:00 el 25 de junio de 2023 y proporcionan una representación visual clara de las diferencias de temperatura.

Figura 16. Fotografías termográficas de los prototipos



Fuente: elaboración propia.

Como se observa, las cámaras termográficas no solo revelan las diferencias de temperatura entre las superficies y los distintos materiales, sino que proporcionan información cuantitativa y visual para el análisis del rendimiento térmico de distintos sistemas y elementos para la mejora continua del diseño arquitectónico. Esta capacidad de detectar de manera simultánea las temperaturas de las superficies capturadas por la cámara permite entender más claramente los fenómenos de transferencia de calor que se dan a través de la envolvente térmica, abriendo nuevas posibilidades para la investigación futura sobre los temas de confort térmico, eficiencia energética y sustentabilidad.

## CONCLUSIONES

La evaluación del comportamiento térmico del prototipo verde en comparación del módulo base demostró que el techo verde puede contribuir al confort térmico dentro de las edificaciones en condiciones de calor extremo. El análisis estadístico (ANOVA y *t* de *student*) valida los datos que indican que el techo verde disminuyó la temperatura promedio diaria de bulbo seco 4.03 °C en promedio, la temperatura interior promedio diaria de la losa es 3.6 °C en promedio y la temperatura de bulbo seco máxima diaria 13 °C en promedio respecto al módulo base. Los resultados muestran que el techo verde no solo ayuda a mantener temperaturas interiores estables y más bajas, sino que también retrasa el tiempo en que se da la temperatura máxima en la superficie interior de la losa hasta por 4 horas y 10 minutos, amortiguando las fluctuaciones térmicas durante el día, con un factor de decremento de

0.552, proporcionando una estabilidad de las variaciones de temperatura del ambiente externo dentro del prototipo con techo verde, reduciendo un 63.25% el tiempo que se tuvo una temperatura mayor a 34.7°C.

Los resultados dan sustento a la eficacia del techo verde en la reducción de la transferencia de calor y en la mejora del confort térmico, lo cual es especialmente relevante en climas calurosos extremos, ya que mediante la disminución de temperatura mediante la implementación de techo verde repercute directamente al confort térmico al interior de los espacios, lo que se refleja en un menor uso de sistemas de aire acondicionado y, por consiguiente, un ahorro energético y una disminución en la contribución al fenómeno de isla de calor urbano. Sin embargo, se reconoce la limitación del estudio realizado bajo condiciones extremas de verano, lo que sugiere la necesidad de realizar mediciones adicionales durante las cuatro estaciones para obtener una evaluación más completa. Lo que resulta como área clave para futuras investigaciones en la aplicación y mejora de techos verdes como estrategia de mitigación térmica en clima cálido seco.

## REFERENCIAS

- Abdalazeem, M. E., Hassan, H., Asawa, T., y Mahmoud, H. (2024). Enhancing energy efficiency in hot climate buildings through integrated photovoltaic panels and green roofs: An experimental study. *Solar Energy*, 270, 1-17. 10.1016/j.solener.2024.112419
- Aboelata, A. (2021). Assessment of green roof benefits on buildings' energy-saving by cooling outdoor spaces in different urban densities in arid cities. *Energy*, 219, 1-22. 10.1016/energy.2020.119514
- Allen, M., Abdul Halim, S., Antwi-Agyei, P., Aragón-Durand, F., Babiker, M., Bertoldi, P., Bindi, M., y Brown, S. (2018). Technical Summary: Global warming of 1.5°C. An Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emissions pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. *International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)*, 1-22. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15716/>
- Alvarado, J., Yanez, O., Zavala, A., y Velázquez, L., (2017). Módulo de prueba para cubierta ecológica en clima árido-seco. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 21 (62), 61-66. [https://www.utm.mx/edi\\_anteriores/temas62/index.html](https://www.utm.mx/edi_anteriores/temas62/index.html)
- Arellano, B., y Roca, J. (2018). Áreas verdes e Isla de Calor Urbana. *International Conference Virtual City and Territory*, 417-432. 10.5821/ctv.8255
- Bevilacqua, P., Bruno, R., y Arcuri, N. (2020). Green roofs in a Mediterranean climate: Energy performances based on in-situ experimental data. *Renewable Energy*, 152, 1414-1430. 10.1016/j.renene.2020.01.085
- Borràs, J.G., Lerma, C., Mas, Á., Vercher, J., y Gil, E. (2022). Contribution of green roofs to energy savings in building renovations. *Energy for Sustainable Development*, 71, 212-221. 10.1016/j.esd.2022.09.020
- Broekhuizen, I., Sandoval, S., Gao, H., Mendez-Rios, F., Leonhardt, G., Bertrand-Krajewski, J.L., y Viklander, M. (2021). Performance comparison of green roof hydrological models for full-scale field sites. *Journal of Hydrology X*, 12, 1-18. 10.1016/j.hydroa.2021.100093
- Cai, L., Feng, X. P., Yu, J. Y., Xiang, Q. C., y Chen, R. (2019). Reduction in carbon dioxide emission and energy savings obtained by using a green roof. *Aerosol and Air Quality Research*, 19, 2432-2445. 10.4209/aaqr.2019.09.0455
- Chihab, Y., Garoum, M., y Laaroussi, N. (2022). Dynamic thermal performance of multilayer hollow clay walls filled with insulation materials: Toward energy saving in hot climates. *Energy and Built Environment*, 5, 70-80. 10.1016/j.enbenv.2022.08.001
- Cuadrat, J.M., Serrano-Notivoli, R., Barrao, S., Saz, M.Á., y Tejedor, E. (2022). Variabilidad temporal de la isla de calor urbana de la ciudad de Zaragoza (España). *Geographical Research Letters*, 48, 97-110. 10.18172/cig.5022
- Delgado, S. (2018). Resiliencia verde urbana en Santiago de Surco, Lima, Perú. [Archivo PDF]. <https://www.urp.edu.pe/pdf/id/17291/n/01-resiliencia-verde-urbana.pdf>
- Dos Santos, S., Silva, J., Dos Santos, G., de Macedo, P., y Gavazza, S. (2019). Integrating conventional and green roofs for mitigating thermal discomfort and water scarcity in urban areas. *Journal of Cleaner Production*, 219, 639-648. 10.1016/j.jclepro.2019.01.068
- Duque, I., y Montoya, J. (2021). Cambio climático y urbanización. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 30 (2), 274-279. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-215X2021000200274&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-215X2021000200274&script=sci_arttext)
- Feitosa, C.R., y Wilkinson, S.J. (2020). Small-scale experiments of seasonal heat stress attenuation through a combination of green roof and green walls. *Journal of Cleaner Production*, 250, 1-10. 10.1016/j.jclepro.2019.119443
- García, G. (2021). *Diseño e implementación de prototipos de techo verde extensivo para el mejoramiento de los parámetros del medio ambiente* (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil. <http://eprints.uanl.mx/23815/1/1080328507.pdf>
- Garnica, A.R. (2020). Efecto en la temperatura para mitigar la isla de calor utilizando dos ecotecnias. *Meio Ambiente (Brasil)*, 2 (5), 28-35. <https://www.meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/92>



- Graça, M., Cruz, S., Monteiro, A., y Neset, T. S. (2022). Designing urban green spaces for climate adaptation: A critical review of research outputs. *Urban Climate*, 42, 1-17. 10.1016/j.uclim.2022.101126
- Green, T.L., Kronenberg, J., Andersson, E., Elmqvist, T., y Gómez-Baggethun, E. (2016). Insurance Value of Green Infrastructure in and Around Cities. *Ecosystems*, 19 (6), 1051-1063. 10.1007/s10021-016-9986-x
- Gunawardena, K.R., Wells, M.J., y Kershaw, T. (2017). Utilizing green and blue space to mitigate urban heat island intensity. *Science of the Total Environment*, 584, 1040-1055.
- He, Y., Yu, H., Dong, N., y Ye, H. (2016). Thermal and energy performance assessment of extensive green roof in summer: A case study of a light-weight building in Shanghai. *Energy and Buildings*, 127, 762-773. 10.1016/j.enbuild.2016.06.016
- He, Y., Yu, H., Ozaki, A., y Dong, N. (2020). Thermal and energy performance of green roof and cool roof: A comparison study in Shanghai area. *Journal of Cleaner Production*, 267, 1-15. 10.1016/j.jclepro.2020.122205
- Jamei, E., Chau, H. W., Seyedmahmoudian, M., Mekhilef, S. S., y Sami, F. A. (2023). Green roof and energy–role of climate and design elements in hot and temperate climates. *Heliyon*, 9, 1-16. 10.1016/j.heliyon.2023.e15917
- Jiang, L., y Tang, M. (2017). Thermal analysis of extensive green roofs combined with night ventilation for space cooling. *Energy and Buildings*, 156, 238-249. 10.1016/j.enbuild.2017.09.080
- Jim, C.Y. (2017). Green roof evolution through exemplars: Germinal prototypes to modern variants. *Sustainable Cities and Society*, 35, 69-82. 10.1016/j.scs.2017.08.001
- Khotbehsara, E.M., Daemei, A.B., y Malekjahan, F.A. (2019). Simulation study of the eco green roof in order to reduce heat transfer in four different climatic zones. *Results in Engineering*, 2, 1-8. 10.1016/j.rineng.2019.100010
- Kontoleon, K. J., y Bikas, D. K. (2007). The effect of south wall's outdoor absorption coefficient on time lag, decrement factor and temperature variations. *Energy and buildings*, 39 (9), 1011-1018. 10.1016/j.enbuild.2006.11.006
- Krebs, L.F., y Johansson, E. (2021). Influence of micro-climate on the effect of green roofs in Southern Brazil – A study coupling outdoor and indoor thermal simulations. *Energy and Buildings*, 241, 1-15. 10.1016/j.enbuild.2021.110963
- Kumar, V.V., Raut, N., y Akeel, N. (2021). Double skin polystyrene- aluminum radiation reflector roofs in arid environments for passive cooling - A case study in Sohar, Sultanate of Oman. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 1-9. doi.org/10.1016/j.csite.2021.101655
- La Roche, P., y Berardi, U. (2014). Comfort and energy savings with active green roofs. *Energy and buildings*, 82, 492-504. 10.1016/j.enbuild.2014.07.055
- La Roche, P., Yeom, D.J., y Ponce, A. (2020). Passive cooling with a hybrid green roof for extreme climates. *Energy and Buildings*, 224, 1-13. 10.1016/j.enbuild.2020.110243
- López, C.F. (2020). Planificación urbana en ciudades dispersas de clima desértico: la densificación vertical como estrategia para la mejora ambiental. El caso de Hermosillo (México) (Tesis de doctorado). Universitat Politècnica de Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/334948>
- Ma'bdeh, S. N., Ali, H. H., y Rabab'ah, I. O. (2022). Sustainable assessment of using green roofs in hot-arid areas–Residential buildings in Jordan. *Journal of Building Engineering*, 45, 1-10. 10.1016/j.jobbe.2021.103559
- Marincic, I. (2022). Una revisión sobre la isla de calor urbana y sus particularidades en zonas desérticas de México. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 6 (12), 9-21. 10.32870/rvcs.v0i12.196
- Marincic, I., Ochoa, J. M., y Río, J. A. D. (2012). Confort térmico adaptativo dependiente de la temperatura y la humedad. *ACE: architecture, city and environment*, 7 (20), 27-46. 10.5821/ace.v7i20.2572
- Mungur, M., Poorun, Y., Juggurnath, D., Ruhomally, Y. B., Rughooputh, R., Dauhoo, M. Z., ... y Facknath, S. (2020). A numerical and experimental investigation of the effectiveness of green roofs in tropical environments: The case study of Mauritius in mid and late winter. *Energy*, 202, 1-17. 10.1016/j.energy.2020.117608
- Novillo, N. (2018). Cambio climático y conflictos socioambientales en ciudades intermedias de América Latina y el Caribe. *Letras Verdes. Revista*

- Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (24), 124-142. 10.17141/letrasverdes.24.2018.3323
- Önder, S., y Akay, A. (2014). The Roles of Plants on Mitigating the Urban Heat Islands' Negative Effects. *International Journal of Agriculture and Economic Development*, 2 (2), 42-56. [https://www.academia.edu/68387555/The\\_Roles\\_of\\_Plants\\_on\\_Mitigating\\_the\\_Urban\\_Heat\\_Islands\\_Negative\\_Effects](https://www.academia.edu/68387555/The_Roles_of_Plants_on_Mitigating_the_Urban_Heat_Islands_Negative_Effects)
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], (2022). *Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities>.
- Rodríguez, S. (2017). *Diseño y evaluación de un sistema de doble cubierta ventilada para reducir la transmisión de calor al interior de la vivienda media en Puerto Vallarta, Jalisco* (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma Metropolitana. <https://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/5944>
- Sahagun, M. (2019). *Análisis del comportamiento térmico de un techo verde desértico y su espesor de sustrato en el clima seco del noroeste de México*. (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma Metropolitana. <https://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/5883>
- Shen, L., Shuai, C., Jiao, L., Tan, Y., y Song, X. (2017). Dynamic sustainability performance during urbanization process between BRICS countries. *Habitat International*, 60, 19-33. 10.1016/j.habitatint.2016.12.004
- Sheng, L.X., Mari, T.S., Mohd Ariffin, A.R., y Hussein, H. (2011). Integrated sustainable roof design. *Procedia Engineering*, 21, 846-852. 10.1016/j.proeng.2011.11.2086
- Suárez, P., Cantón, A., y Correa, É. (2020). Efecto térmico de fachadas verdes tradicionales en envoltentes de viviendas unifamiliares con orientación este. Análisis de casos en el Área Metropolitana de Mendoza. *Arquitecto*, 7-16. 10.30972/arq.0154375
- UN-Habitat, The United Nation Human Settlements Programme (2022). *World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities*. [Archivo PDF]. [https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr\\_2022.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf)
- Wang, X., Tian, Y., y Zhao, X. (2017) The influence of dual-substrate-layer extensive green roofs on rainwater runoff quantity and quality. *Science of the Total Environment*, 592, 465-476. 10.1016/j.scitotenv.2017.03.124.
- WeatherSpark (2024). Climate and Average Weather Year Round in Hermosillo. Recuperado de: <https://weatherspark.com/y/2821/Average-Weather-in-Hermosillo-Mexico-Year-Round>
- Yang, J., Zhao, Y., Zou, Y., Xia, D., Lou, S., Guo, T., y Zhong, Z. (2022). Improving the Thermal Comfort of an Open Space via Landscape Design: A Case Study in Hot and Humid Areas. *Atmosphere*, 13 (10), 1-24.10.3390/atmos13101604

## NOTAS DE AUTOR

<sup>a</sup> Maestra en Sustentabilidad por parte de la Universidad de Sonora (Unison), cuenta con una especialidad en Desarrollo Sustentable. Sus principales líneas de investigación son: arquitectura bioclimática y especialidad en techos verdes. Correo electrónico: anage.cvs@gmail.com. Autora de correspondencia.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2863-6599>

<sup>b</sup> Doctor por la Universidad de Sonora en el área de arquitectura, energía y medio ambiente. Actualmente es profesor-investigador en el Departamento de Ingeniería Civil y Minas de la Universidad de Sonora. Sus líneas de investigación están enfocadas en la edificación y construcción sustentable, eficiencia energética de edificios y materiales de construcción aislantes. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores [SNI] en nivel de candidato. Correo electrónico: juan.ayala@unison.mx.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7708-4113>

## Últimas publicaciones

Ayala, J. P., y Ayala, A. A. (2024). Experimental investigation of night ventilation for cooling a kitchen in hot dry summer conditions. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 25 (3), 1-14. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.3.021>

Ayala, A. A., y Ayala, J. P. (2020). Reciclaje arquitectónico y urbano: Una breve introducción. *MAD-*

GU. Mundo, *Arquitectura, Diseño Gráfico y Urbanismo*, 3 (5), 12-23. <https://doi.org/10.36800/madgu.v3i5.50>

Ayala, J., Marincic, I., y Borbón, A. C. (2019). Ventilación pasiva en una casa-habitación por efecto chimenea. En M. G. Alpuche (Coord.), *Estudios sobre energía y medioambiente en la arquitectura* (pp. 1-36). Pearson/Universidad de Sonora. <https://doi.org/10.47807/UNISON.61>

<sup>c</sup> Doctor en Ciencias por parte de la Universidad de Massachusetts-Lowell, con una especialidad en Desarrollo Sustentable por parte de la Universidad de Sonora (Unison). Profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Industrial y en el Programa de Posgrado en Sustentabilidad en la Unison, en Hermosillo, México. Sus áreas de investigación son: el desarrollo sustentable, prevención de la contaminación, seguridad e higiene ocupacional, producción más limpia, sistemas de gestión para la sustentabilidad, eficiencia energética, y educación para el desarrollo sustentable. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) nivel 1. Correo electrónico: javier.esquer@unison.mx  
ORCID: 0000-0002-3031-1104.

### Últimas publicaciones

Esquer, J., Munguia, N., y Velazquez, L. (2022). Increasing Young People's Environmental Awareness. En R. C. Brears (Ed.), *The Palgrave Encyclopedia of Urban and Regional Futures*. (pp.1-10). Palgrave Macmillan-Springer International Publishing: Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51812-7\\_121-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51812-7_121-1)

Jiménez-Hernández, V. G., Guzmán-Grijalva, H. M., García-Navarrete, G., Ramos-Enríquez, J.R., Esquer, J., y Alvarado-Ibarra, J. (2022). Microbiota fúngica del aire interior de un Centro de Desarrollo Infantil en zona árida. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25, 1-9. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022>

Quintana, Z., Slim, D., Esquer, J., y Munguia, N. (2022). Factors that Hinder the Implementation of Sustainability Initiatives in Higher Edu-

cation Institutions. Chapter 5. En A. A., Kelum Gamage, N. Gunawardhana (Eds.). *The Wiley Handbook of Sustainability in Higher Education Learning and Teaching* [Primera edición] (pp. 79-98). John Wiley & Sons, Inc. <https://online-library.wiley.com/doi/10.1002/9781119852858.ch5Nora>

<sup>d</sup> Doctora en ciencias de la ingeniería por la Universidad de Massachusetts-Lowell en el área de producción más limpia y prevención de la contaminación. Actualmente es coordinadora de la licenciatura en sustentabilidad modalidad en línea de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Sonora. Sus líneas de investigación están enfocadas en estudios de producción más limpia, salud ocupacional, así como educación ambiental. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) nivel 2. Correo electrónico: nora.munguia@unison.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2352-3165>

### Últimas publicaciones

Munguia, N., Romero, A., Anaya-Eredias, C., Perkins, K.M., y Velazquez, L. (2023). Globalwarming in the minds of Mexican higher education students: an exploratory study. *International Journal of Sustainability in Higher Education*. 24 (2), 317-338. <https://doi.org/10.1108/IJSHE-09-2021-0365>

Gamage, K.A.A., Munguia, N., y Velazquez, L. (2022). Happy Sustainability: A Future Quest for More Sustainable Universities. *Social Sciences*, 11 (1), 1-8. <https://doi.org/10.3390/socsci11010024>

Perkins, K.M., Munguia, N., Ellenbecker, M., Moure-Eraso, R., y Velazquez, L. (2021). COVID-19 pandemic lessons to facilitate future engagement in the global climate crisis. *Journal of Cleaner Production*. 290, 125178, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125178>

<sup>e</sup> Doctora en Ciencia de Materiales por la Universidad de Sonora. Actualmente es Técnico Académico en el Departamento de Polímeros y Materiales de la Universidad de Sonora. Colabora con la academia de Ingeniería Sustentable en la línea de investigación de Producción más

limpia y con la academia de Nanociencias e Ingeniería Sostenible de Nanomateriales con la línea de investigación de adsorbentes de bajo costo para remover contaminantes del ambiente. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) nivel 1. Correo electrónico: juana.alvarado@unison.mx. ORCID: 0000-0003-3837-1694

### Últimas publicaciones

- Flores-León, J.R., Rodríguez-Félix, D.E., Quiroz-Castillo, J.M., Burrola-Núñez, H., Castillo-Ortega, M.M., Encinas-Encinas, J.C., Alvarado-Ibarra, J., Santacruz-Ortega, H., Valenzuela-García, J.L., y Herrera-Franco, P.J. (2024). Effect of Degradation on the Physicochemical and Mechanical Properties of Extruded Films of Poly (lactic acid) and Chitosan. *ACS Omega*, 9, 9526-9535. DOI 10.1021/acsomega.3c09296
- Alvarado-Ibarra, J., Ochoa-Cabrera, K. y Burrola-Núñez, H. (2024). Reciclacentros: a sustainable municipal solid waste management initiative in a Mexican city. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (111), 48-54. DOI 10.17533/udea.redin.20231131
- Rodríguez-Félix, D.E., Pérez-Caballero, D., del Castillo-Castro, T., Castillo-Ortega, M.M., Garmendia-Diago, Y., Alvarado-Ibarra, J., Plascencia-Jatomea, M., Ledezma-Pérez, A.S., y Burrueal-Ibarra, S.E. (2023). *Polymer Bulletin*, 80 (3), 2617-2636. DOI 10.1007/s00289-022-04152-y