

DISEÑO DE SISTEMA INDIRECTO DE FACHADA VERDE PARA MEJORAR EL CONFORT TÉRMICO EN VIVIENDAS MULTIFAMILIARES

Recibido 17/12/2025
 Aceptado 20/05/2026

DESIGN OF AN INDIRECT GREEN FAÇADE SYSTEM TO IMPROVE THERMAL COMFORT IN MULTIFAMILY HOUSING

DESENHO DE SISTEMA INDIRETO DE FACHADA VERDE PARA MELHORAR O CONFORTO TÉRMICO EM HABITAÇÕES MULTIFAMILIARES

Analucia Espinoza-Abarca

Bachiller en Arquitectura
 Estudiante, Facultad de Arquitectura
 Universidad Tecnológica del Perú
 Lima, Perú
<https://orcid.org/0009-0007-9240-5433>
u20202371@utp.edu.pe

Alis Tasayco-Huanca (Autor de Correspondencia)

Bachiller en Arquitectura
 Estudiante, Facultad de Arquitectura
 Universidad Tecnológica del Perú
 Lima, Perú
<https://orcid.org/0009-0001-9807-6294>
U20302943@utp.edu.pe

Víctor Miranda-Alfaro

Doctor en Ingeniería Ambiental
 Docente, Facultad de Ingeniería
 Universidad Tecnológica del Perú
 Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-4857-8800>
C26968@utp.edu.pe



RESUMEN

El crecimiento urbano no planificado en Lima Norte ha intensificado las islas de calor urbano, que afectan el confort térmico en viviendas multifamiliares autoconstruidas. Este estudio evalúa el desempeño de un sistema indirecto de fachada verde como estrategia pasiva de mitigación térmica en una vivienda ubicada en San Martín de Porres. Se empleó un enfoque cuantitativo con un diseño cuasiexperimental, que combina la simulación térmica en SIMEDIF 2.0 y mediciones in situ con un termohigrómetro digital. Los resultados muestran una reducción de la temperatura interior de hasta 2 °C en mediciones reales y de hasta 3 °C en simulaciones, además de una disminución de la radiación solar incidente sobre la fachada. Se concluye que el sistema es constructivamente viable y mejora el confort térmico en contextos de autoconstrucción urbana.

Palabras clave

fachada verde indirecta, confort térmico, análisis térmico, estrategias pasivas, viviendas multifamiliares.

ABSTRACT

Unplanned urban growth in Northern Lima has intensified urban heat islands, affecting thermal comfort in self-built multifamily housing. This study evaluates the performance of an indirect green façade system as a passive thermal mitigation strategy in a dwelling located in San Martín de Porres. A quantitative approach with a quasi-experimental design was employed, combining thermal simulation in SIMEDIF 2.0 with in situ measurements using a digital thermo-hygrometer. The results show a reduction in indoor temperature of up to 2 °C in real measurements and up to 3 °C in simulations, as well as a decrease in incident solar radiation on the façade. It is concluded that the system is constructively viable and improves thermal comfort in urban self-built contexts.

Keywords

indirect green façade, thermal comfort, thermal analysis, passive strategies, multifamily housing

RESUMO

O crescimento urbano não planejado na região norte de Lima intensificou as ilhas de calor urbanas, afetando o conforto térmico em habitações multifamiliares autoconstruídas. Este estudo avalia o desempenho de um sistema indireto de fachada verde como estratégia passiva de mitigação térmica em uma habitação localizada em San Martín de Porres. Foi empregada uma abordagem quantitativa, com desenho quase experimental, que combina simulação térmica no SIMEDIF 2.0 e medições in situ realizadas com um termohigrômetro digital. Os resultados mostram uma redução da temperatura interna de até 2 °C nas medições reais e de até 3 °C nas simulações, além de uma diminuição da radiação solar incidente sobre a fachada. Conclui-se que o sistema é viável do ponto de vista construtivo e melhora o conforto térmico em contextos de autoconstrução urbana.

Palavras-chave

fachada verde indireta, conforto térmico, análise térmica, estratégias passivas, habitações multifamiliares

INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano acelerado y la alta densidad edificatoria han intensificado las islas de calor urbano (UHI), que elevan las temperaturas en zonas densamente urbanizadas por la reducción de áreas verdes y el predominio de superficies como concreto y asfalto, lo que afecta el confort ambiental y la calidad de vida (Fargallah & Ragheb, 2022; Soberón Forsberg & Obregón Párraga, 2016). En Lima, este fenómeno se encuentra asociado al reemplazo progresivo de áreas vegetadas por edificaciones y al crecimiento urbano continuo, factores que favorecen la acumulación de calor y afectan el confort ambiental. Asimismo, se han registrado diferencias térmicas de hasta 3.7 °C entre distritos asociadas a la escasa vegetación (Barros & Menacho Casimiro, 2014). En San Martín de Porres, este fenómeno se agrava por un crecimiento urbano no planificado, donde la expansión edificatoria predomina sobre las áreas verdes; el distrito dispone de solo 1.86 m² de áreas verdes por habitante, muy por debajo de lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), lo que favorece la acumulación de calor y reduce el confort térmico interior.

Frente a este escenario, las estrategias pasivas han ganado relevancia para mejorar el confort térmico en viviendas mediante la reducción de la ganancia de calor con soluciones de bajo consumo. Entre estas estrategias, la vegetación, aplicada mediante fachadas verdes directas (GF) o indirectas (SGF), atenúa la radiación solar, estabiliza el microclima y reduce la temperatura de muros y espacios interiores, disminuyéndose la necesidad de ventilación mecánica Marchioretto et al. (2023). Asimismo, una revisión sistemática sobre sistemas de vegetación vertical señala que estos contribuyen al desempeño térmico de las edificaciones mediante mecanismos de sombreado, aislamiento y enfriamiento evaporativo, lo que favorece la reducción de las ganancias de calor y mejora las condiciones de confort interior (Bustami et al., 2018). Mientras el GF se desarrolla directamente sobre el muro y puede retener humedad, el SGF utiliza una estructura separada que crea una cámara de aire ventilada, que protege el muro y resulta más adecuado para viviendas autoconstruidas por su bajo impacto estructural (El Menshawry et al., 2022).

Por otra parte, diversos estudios han demostrado la eficacia de los sistemas indirectos de fachada verde como estrategia pasiva de mitigación térmica, mediante enfoques experimentales y simulaciones. Ramadhan y Mahmoud (2023) reportan que estas fachadas reducen la carga térmica, el consumo energético (hasta en 75 %) y las emisiones de CO₂ (45 %), manteniendo condiciones adecuadas de confort. De manera complementaria, Tudiwer y Korjenic (2017) evidencian, a partir de ensayos experimentales, que los muros verdes indirectos pueden disminuir la temperatura interior hasta en 5 °C y bloquear cerca del 90 % de la radiación solar incidente. Igualmente,

Lesjak et al. (2020) concluyen, mediante mediciones experimentales y simulaciones térmicas, que las fachadas verdes indirectas constituyen una estrategia eficaz para prevenir el sobrecalentamiento de los edificios, al reducir la radiación solar incidente sobre la envolvente y disminuir la temperatura operativa interior, mejorando así las condiciones de confort térmico durante el verano.

Asimismo, Suárez et al. (2023), demuestran su efectividad en climas áridos, al lograr reducciones en la temperatura ambiente interior de hasta 4.4 °C en verano y disminuciones de la temperatura ambiente exterior mediata de hasta 3.9 °C en la estación cálida. De forma similar, Gómez et al. (2023), a través de simulaciones térmicas y análisis de radiación por orientación, evidenciaron reducciones de hasta 74 % en fachadas este, lo que permite descensos de la temperatura interior entre 0.6 °C y 4.5 °C. Finalmente, Suárez et al. (2020) reportaron reducciones de hasta 26.5 °C y 27.4 °C en la temperatura superficial exterior durante los periodos evaluados del 2019 y 2020. Además, el desempeño del muro con fachada verde presentó una amplitud térmica cercana a 6 °C, significativamente menor que la registrada en el muro testigo, cuya amplitud osciló entre 24 °C y 31 °C.

Por lo tanto, si bien diversos estudios han demostrado la eficacia de las fachadas verdes para reducir la temperatura interior, la mayoría se ha desarrollado mediante simulaciones o en contextos climáticos distintos al de Lima. Asimismo, investigaciones que combinan monitoreo experimental y simulación térmica han demostrado que la incorporación de vegetación en elementos verticales constituye una estrategia pasiva eficaz para disminuir la ganancia de calor y mejorar la calidad ambiental interior (Domínguez Cicorio et al., 2022). Sin embargo, aún existe escasa evidencia empírica obtenida mediante mediciones in situ sobre el desempeño térmico de sistemas indirectos de fachada verde en viviendas autoconstruidas ubicadas en climas áridos costeros como el de Lima. En consecuencia, el presente estudio busca abordar esta brecha mediante la evaluación térmica de un sistema indirecto de fachada verde a través de mediciones in situ y simulaciones térmicas.

El problema de investigación radica en el bajo confort térmico de las viviendas autoconstruidas en San Martín de Porres, causado por la ausencia de estrategias pasivas de regulación térmica, la limitada presencia de áreas verdes y las altas temperaturas urbanas. Estas viviendas, al haberse edificado sin criterios técnicos, presentan orientaciones inadecuadas, deficiente ventilación natural y una distribución espacial poco eficiente, lo que favorece la acumulación de calor en los ambientes interiores y afecta el bienestar de los ocupantes. En este contexto, se plantea la siguiente interrogante: ¿Cómo el diseño de un sistema indirecto de fachada verde mejora el confort térmico en viviendas multifamiliares?



Figura 1. Zona de estudio, SMP, Lima. Fuente: Google Earth.

Figura 2. Foto de la vivienda. Fuente: Elaboración de los autores.

El objetivo general del estudio es diseñar un sistema indirecto de fachada verde que mejore el confort térmico en una vivienda multifamiliar. Para ello, se identifican las condiciones climáticas de San Martín de Porres a partir de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), se desarrolla un prototipo liviano y de fácil instalación compatible con viviendas autoconstruidas, y se evalúa su desempeño térmico a través de mediciones in situ y simulaciones computacionales, que compara las temperaturas interiores antes y después de su implementación. Se plantea la hipótesis de que la implementación de un SGF en la vivienda permitirá reducir la temperatura interior en aproximadamente 23 °C, debido a la disminución de la radiación solar y la amortiguación térmica proporcionada por la cámara de aire y la vegetación, tal como señalan Abdeen y Rafaat (2024) y Suárez et al. (2020) respecto al potencial de las fachadas verdes para mejorar el confort térmico interior.

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio se ubica en las coordenadas 12.026287° S, 77.082624° O, en el distrito de San Martín de Porres, Lima, Perú (Figura 1), y corresponde a una vivienda multifamiliar autoconstruida (Figura 2). La fachada principal, orientada hacia el sureste, está expuesta a radiación solar directa durante el verano, principalmente en horas de la mañana, lo que incrementa las ganancias térmicas de la envolvente y contribuye al aumento de la temperatura interior. Asimismo, en determinados ambientes, esta condición se asocia con temperaturas operativas superiores a 29 °C.

La edificación está resuelta mediante muros portantes de ladrillo pandereta de 15 cm de espesor, lo que restringe intervenciones que impliquen modificaciones sustanciales de la configuración constructiva. Esta condición limita la factibilidad de incorporar determinadas estrategias pasivas de acondicionamiento ambiental. Adicionalmente, la

compacidad de la planta y las reducidas dimensiones de las aberturas restringen el potencial de ventilación natural e iluminación diurna, que favorecen la acumulación de calor en los espacios interiores.

METODOLOGÍA

Este proyecto adopta un enfoque cuantitativo que evalúa el impacto del sistema indirecto de fachada verde mediante el análisis de registros térmicos interiores, complementados con simulaciones computacionales. Su alcance es explicativo, pues busca identificar la relación causal entre la implementación del sistema indirecto de fachada verde, la reducción de la temperatura interior y superficial de los ambientes, y su eficacia frente a la radiación solar.

Se emplea un diseño cuasiexperimento, donde no se manipulan las condiciones del entorno y se compara el comportamiento térmico de los ambientes con y sin la presencia del sistema de fachada verde, lo que permite analizar sus efectos en condiciones reales. Asimismo, el diseño es transversal, ya que las mediciones térmicas se realizan en un periodo de tiempo específico, por lo que se analiza el comportamiento térmico de los ambientes en un momento determinado sin seguimiento longitudinal.

La población de estudio está conformada por viviendas multifamiliares de San Martín de Porres expuestas a la radiación solar. La muestra corresponde a un departamento del segundo piso, cuya orientación permite evaluar el desempeño térmico del sistema de fachada verde. Las mediciones se realizaron en los ambientes con frente a dicha fachada, al obtener datos detallados del comportamiento térmico en el caso de estudio

ETAPAS METEODOLÓGICAS

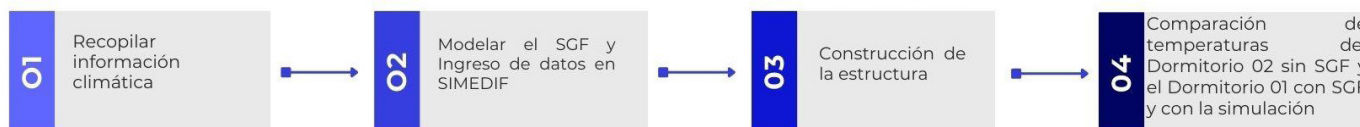


Figura 3. Fases metodológicas Fuente: Elaboración de los autores.

AÑO	2024				2025			
Mes	FEB	MAR	AGOST	SEPT	FEB	MAR	AGOST	SEPT
Temperatura Max.	31.9	29	20	21.3	29.5	29.4	20.6	23.2
Humedad	47.43	56.06	67.73	63.93	56.67	51.56	67.9	69.67

Tabla 1. Temperatura mensual en SMP (2024–2025) Fuente: Elaboración por los autores extraído con datos del SENAMHI (s.f.)

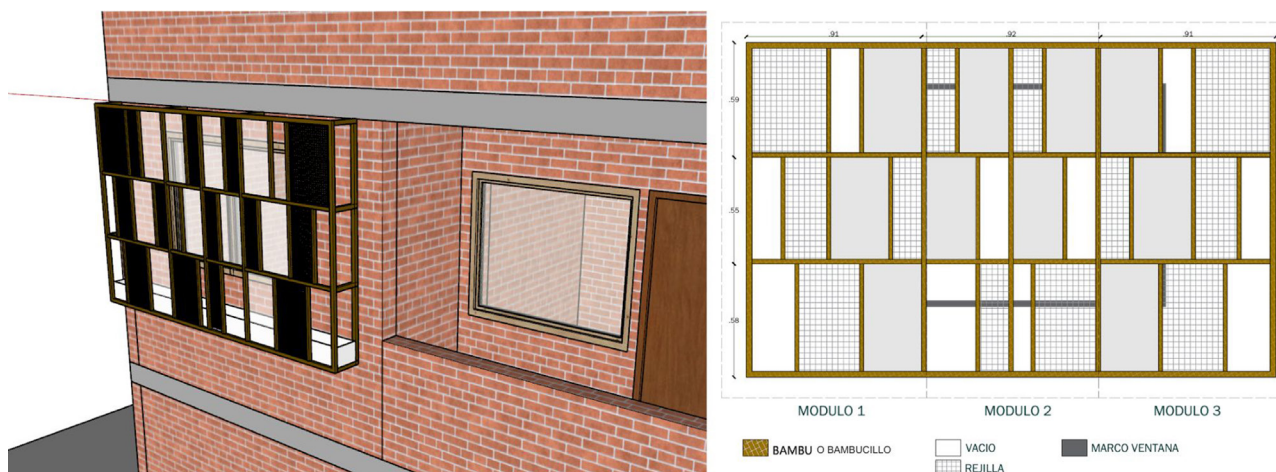


Figura 4. Modelación en SKP de la estructura y materialidad de la vivienda. Fuente: Elaboración de los autores.
 Figura 5. Estructura SGF en AutoCAD. Fuente: Elaboración de los autores.

Las técnicas empleadas en la investigación se basan en modelos computacionales desarrollados principalmente en SIMEDIF, programa de simulación térmica que permite analizar el comportamiento térmico de ambientes según sus materiales, condiciones climáticas y características constructivas. También se utilizó AutoCAD y SketchUp, y mediciones con un termohigrómetro digital de uso interior, verificado mediante lecturas comparativas para registrar temperaturas interiores del prototipo.

A continuación, se presentan las etapas metodológicas empleadas en esta investigación, en las que se describe cada fase del proceso desde la recopilación de información y el modelado térmico hasta el análisis de datos y la evaluación del impacto de la fachada verde en el confort térmico (Figura 3).

PRIMERA FASE

Se recopilaron datos climáticos del distrito de San Martín de Porres a partir de los registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI] correspondientes al periodo 2024–2025, que considera temperatura máxima, temperatura promedio y humedad relativa en verano e invierno.

La Tabla 1 presenta las temperaturas mensuales, las que oscilan entre 20.6 °C y 29.5 °C, con picos en verano de 31.9 °C. Por ello, el análisis se centró en los meses de verano e invierno, periodos que presentan los valores más extremos. En función de ello, se seleccionaron los meses de noviembre, diciembre, febrero y agosto para evaluar el desempeño del sistema indirecto frente a dichas condiciones térmicas.



Figura 6. Ensamblaje del sistema estructural de bambú. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 7. Ensamblaje del sistema estructural del bambucillo e instalación al muro. Fuente: Elaboración de los autores.

SEGUNDA FASE

En la segunda etapa se definieron los materiales y se desarrollaron los prototipos del sistema indirecto. Para la estructura, se consideró el bambú por su resistencia, sostenibilidad y facilidad constructiva. Se elaboraron dos prototipos iniciales: uno de bambú, de mayor complejidad en su ejecución, y otro de bambucillo, que resultó ser más liviano y sencillo de manejar. Ambos fueron modelados en 3D en AutoCAD y SketchUp (Figura 4 y Figura 5). Asimismo, se seleccionaron especies trepadoras *Epipremnum aureum* con un crecimiento de $LAI \approx 2,5$, *Vinca major*, *Ficus pumila* y *Hedera helix* $LAI \approx 2,5$ por su resistencia a la radiación solar directa, considerando el empleo de vegetación trepadora sobre estructuras de soporte, una configuración característica de los sistemas indirectos de fachada verde.

Por otro lado, se utilizó el software SIMEDIF para la simulación térmica, en donde se definieron tres zonas térmicas dormitorio 1, dormitorio 2 y sala, según los datos de la Tabla 2. En la simulación se incorporaron los parámetros de la Tabla 3, donde se especifican las características de muros y pisos, como la conductancia, la transmitancia

LOCAL	ÁREA DE SUELO m ²	VOLUMEN m ³
Dormitorio 1	10.61	31.09
Sala / comedor	9.09	51.024
Dormitorio 2	11.21	30.67

Tabla 2. Características de las zonas térmicas. Fuente: Elaboración de los autores.

PARED MACIZA	ABSORTANCIA SOLAR	W/m ² -K	ESPESOR (m)
Exterior	0.55	8	0.12 y 0.30
Interior	0.15	6	0.12
Piso	0.3	0.01	0.20
Techo	0.4	6	0.20

Tabla 3. Propiedades térmicas. Fuente: Elaboración de los autores.

térmica (U) y la inercia térmica. Asimismo, se ingresaron las dimensiones del sistema indirecto 2.5×4.5 m para evaluar su comportamiento térmico durante el modelado.

Para la fachada verde se propuso la planta *Hedera helix* con un largo de hoja de 0.15m, con una resistencia estomática de 160 s/m y una renovación de aire en verano de 23 1/h y en invierno una renovación de 5 1/h.

TERCERA FASE

Esta fase tuvo como objetivo construir el prototipo del SGF y verificar su viabilidad constructiva e integración con la vegetación.

En la tercera etapa se construyeron dos prototipos. El primer prototipo, de bambú (2.5×1.70 m), requirió un proceso previo de secado y un ensamblaje complejo con cortes tipo boca de pescado, se utilizaron espárragos, arandelas y tuercas para garantizar estabilidad (Figura 6). El segundo prototipo, fabricado con bambucillo de 1 1/2", empleó amarres tipo aspas con cintillo, lo que permitió no solo replicar el diseño original sino también ampliar sus dimensiones a 2.5×4.5 m, gracias a su menor peso. Finalmente, la estructura fue barnizada para mejorar su durabilidad y resistencia a la humedad (Figura 7).

CUARTA FASE

En esta fase se llevó a cabo la comparación de la temperatura del aire interior. Para ello, se empleó la zona térmica 03 como ambiente de referencia, donde se midió la temperatura sin intervención. Posteriormente, se realizó una comparación con la zona térmica 1, en el que estaría instalado el sistema indirecto de fachada verde (Figura 8). Esta elección se fundamenta en que ambos dormitorios presentan la misma distribución espacial, dimensiones y tamaño de vano de ventana, lo que minimiza la influencia de variables geométricas en los resultados y asegura la comparabilidad entre ambos ambientes. Además, se contrastarán los resultados de estas condiciones reales con los derivados de la simulación térmica, para verificar la eficiencia del sistema propuesto.

Las mediciones se efectuaron con un termohigrómetro digital MDL 2140, con un rango de medición de temperatura de -50°C a $+70^{\circ}\text{C}$ y tolerancia de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ en el rango de 0°C a $+40^{\circ}\text{C}$, se registraron datos cada cuatro horas cada cuatro horas (8:00, 14:00 y 20:00) durante el periodo comprendido entre el 1 de noviembre y el 12 de diciembre del 2025, seleccionado por representar condiciones climáticas cálidas características de la zona de estudio.

El sensor se ubicó a 1.10 m sobre el nivel del piso y a una distancia mínima de 1.0 m del muro de fachada, se siguieron los criterios de la norma UNE-EN ISO 7726, con el fin de representar la zona ocupada y evitar

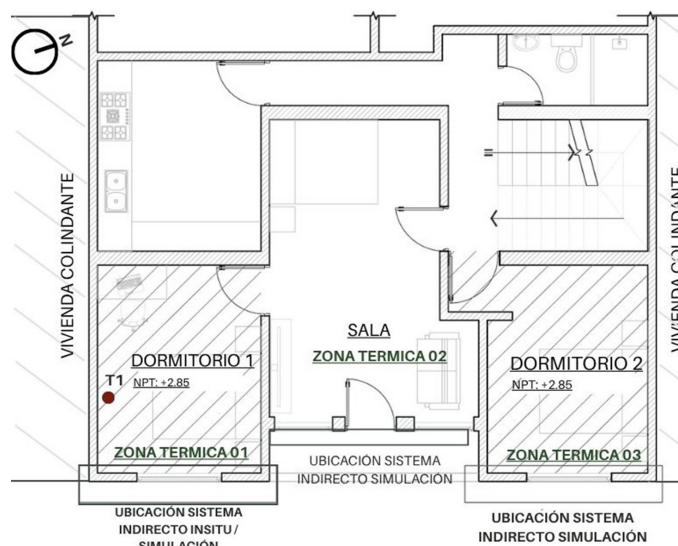


Figura 8. Plano vivienda y ubicación del termohigrómetro. Fuente: Elaboración de los autores.

interferencias por radiación superficial. Durante las mediciones, el dormitorio se mantuvo sin ocupación y con puertas y ventanas cerradas. No se utilizó ventilación mecánica, y las mediciones se realizaron en días sin clima atípico, como lluvias o vientos intensos, para asegurar condiciones comparables antes y después del sistema. Previamente al registro, se verificaron el equipo con lecturas comparativas en un mismo ambiente para comprobar la estabilidad de los datos.

Los datos obtenidos se organizaron en hojas de cálculo y se analizaron mediante perfiles horarios, lo que permitió evaluar la variación térmica generada por el sistema implementado y contrastar el comportamiento térmico real del ambiente con los resultados de la simulación.

RESULTADOS

Para el análisis, se consideraron dos escenarios: el modelo base sin intervención y el modelo con la implementación del SGF. Ambos fueron evaluados mediante el programa SIMEDIF, al cual se le ingresaron datos térmicos y técnicos de muros y ventanas, complementados con mediciones reales de temperatura interior. Finalmente, se compararon los resultados de la simulación con los del prototipo in situ.

MODELO BASE

La Figura 9 muestra el pronóstico de la temperatura del aire interior en las zonas térmicas evaluadas antes de la implementación de la fachada verde, correspondientes a los meses de noviembre, diciembre, febrero y agosto. Los resultados evidencian un incremento estacional de

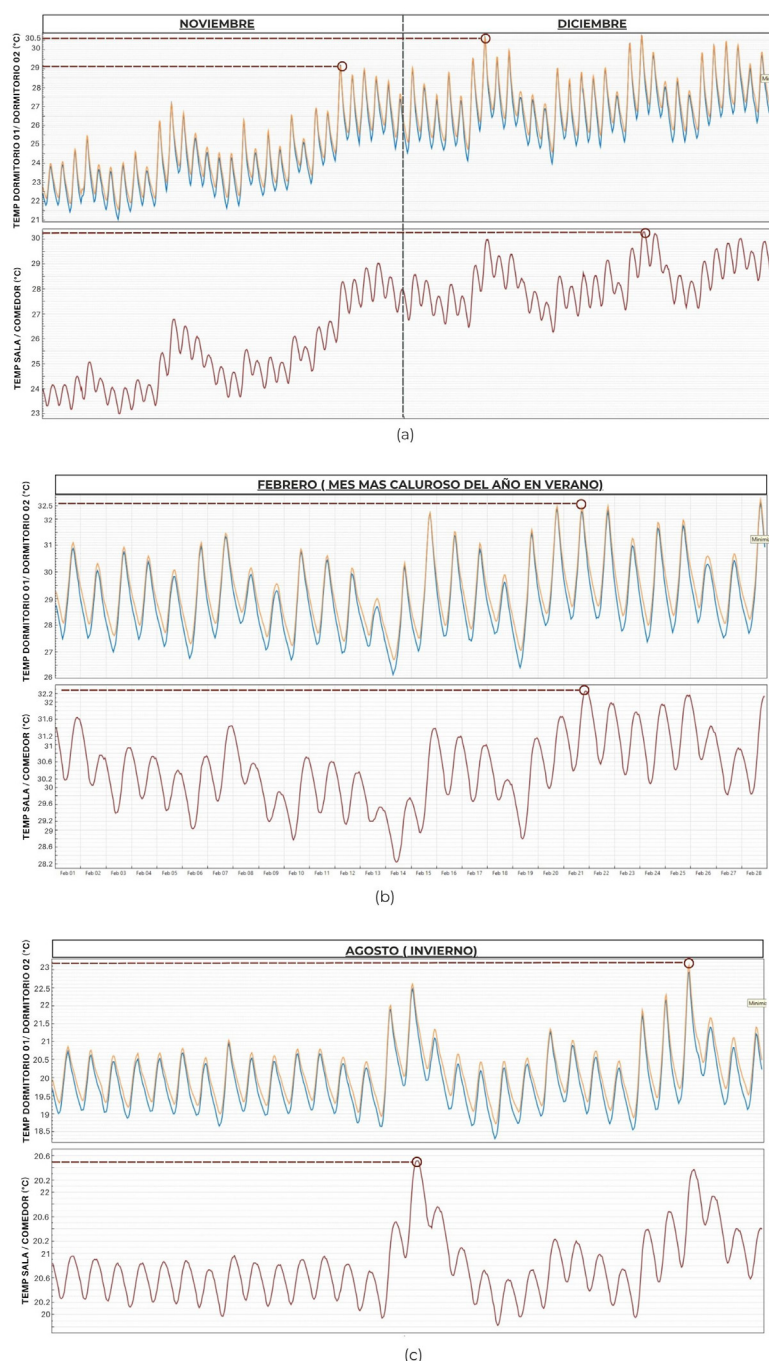


Figura 9. Temperatura superficial de las zonas térmicas sin la implementación del SGF en los 4 meses analizados.
 Fuente: Elaboración de los autores con datos del SIMEDIF.

la temperatura interior desde el periodo invernal hacia el periodo de verano, con la condición térmica más desfavorable en febrero. En este mes, el Dormitorio 01 registró la temperatura máxima más alta (32,5 °C), seguido por el Dormitorio 02 con valores similares, mientras que la Sala alcanzó un máximo de 32,0 °C. En diciembre, las temperaturas máximas se situaron en un rango de 30,0-30,5 °C, mientras que en noviembre variaron entre 28,5 y 29,0 °C. En contraste, durante agosto, correspondiente al periodo de menor exigencia térmica, las temperaturas descendieron a un intervalo de 22,5-23,0 °C.

En términos comparativos, las diferencias entre ambientes fueron menores a 1,0 °C en todos los meses analizados, lo que indica una respuesta térmica interior homogénea. Este comportamiento sugiere que la variación espacial de la temperatura es reducida y que el sobrecalentamiento observado se manifiesta de manera relativamente uniforme en la vivienda evaluada.

Complementariamente, la Figura 10 presenta la distribución horaria de la temperatura interior mediante mapas de calor, que permite identificar el patrón de

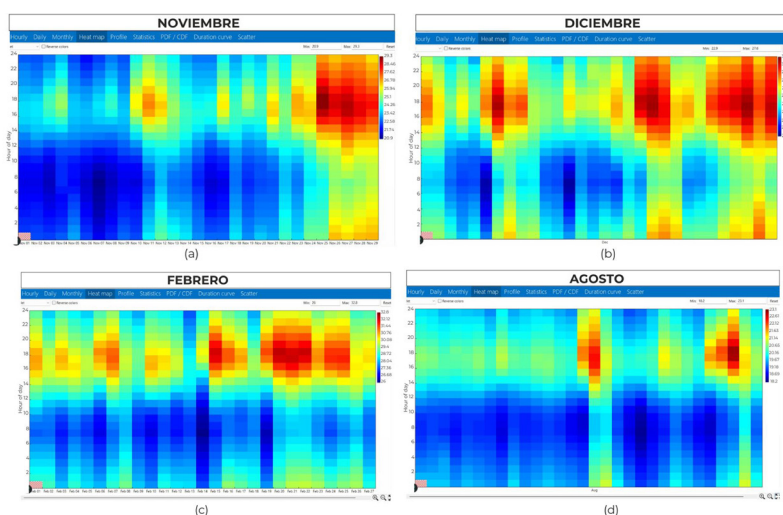


Figura 10. Mapa de calor por rango de horario sin SGF. Fuente: Elaboración de los autores con datos del SIMEDIF.

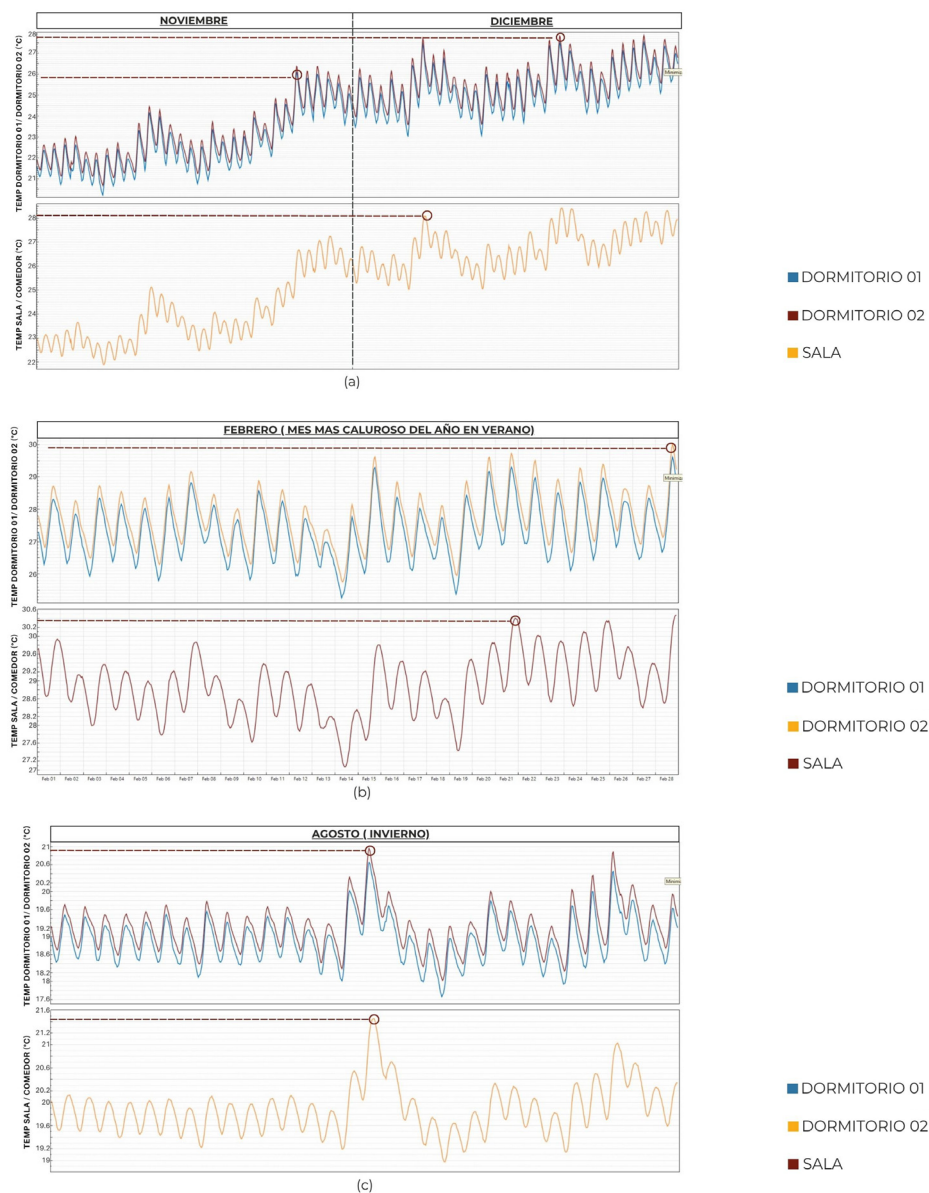


Figura 11. Resultado de simulación de temperatura con el SGF. Fuente: Elaboración de los autores con datos del SIMEDIF.

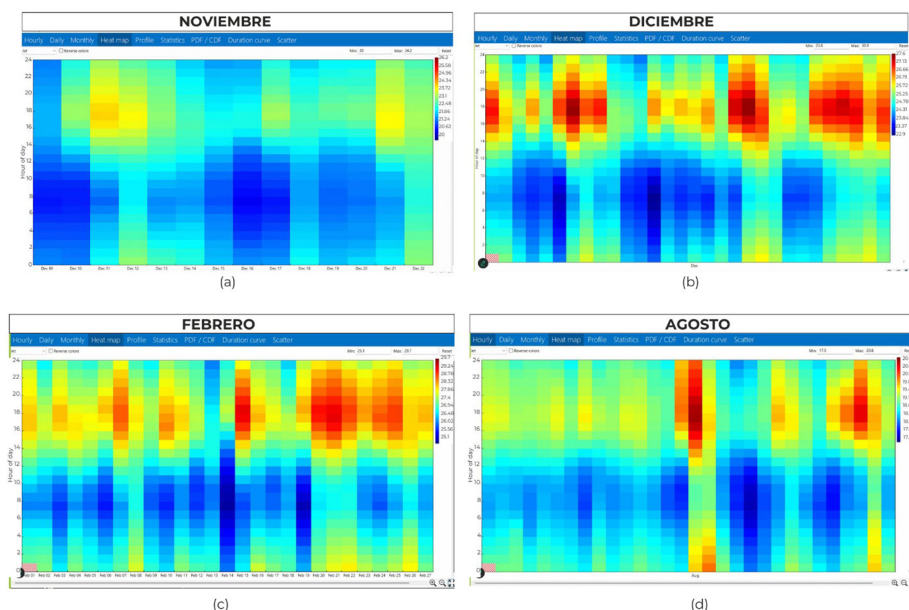


Figura 12. Mapa de calor con rango de horario de las 3 zonas térmicas con el SGF Fuente: Elaboración de los autores con datos del SIMEDIF.

evolución térmica diaria en los cuatro meses analizados. En todos los casos, la temperatura se incrementa progresivamente desde las primeras horas de la mañana y alcanza valores cercanos a 25 °C antes del mediodía. No obstante, el periodo de mayor exigencia térmica se concentra entre las 14:00 y 18:00 hrs., intervalo en el que los tres ambientes alcanzan simultáneamente sus valores máximos. Este comportamiento confirma la existencia de un desfase térmico diurno y permite identificar dicha franja como el periodo crítico de acumulación térmica en el interior de la vivienda.

MODELO CON IMPLEMENTACIÓN SGF

La Figura 11 muestra el comportamiento térmico interior posterior a la implementación del Sistema de Fachada Verde (SGF) en los ambientes evaluados. En comparación con el escenario base, se observa una reducción de las temperaturas máximas en todos los casos analizados. En el Dormitorio 02, los valores máximos se situaron en 21.4 °C en agosto, 26.0 °C en noviembre, 28.5 °C en diciembre y 30.0 °C en febrero, manteniéndose este último como el mes de mayor exigencia térmica. No obstante, aún bajo esta condición, la temperatura media registrada en febrero se mantuvo alrededor de 28 °C, evidenciándose una atenuación del sobrecalentamiento respecto del escenario sin SGF.

En los Dormitorios 01 y 02, la temperatura promedio durante noviembre fue de aproximadamente 22.8 °C, lo que representa una disminución cercana a 2 °C respecto del escenario sin intervención. En términos comparativos, este descenso fue consistente en ambos ambientes, lo

que confirma una reducción uniforme de la carga térmica en espacios de permanencia prolongada.

El análisis del perfil térmico horario de 24 horas indica que los máximos diarios continúan concentrándose entre las 14:00 y 16:00 h, es decir, dentro de la franja de mayor exigencia térmica del día. Sin embargo, la magnitud de estos picos resulta menor que en el caso sin SGF, lo que evidencia un efecto de amortiguamiento térmico del sistema.

Complementariamente, la Figura 12 presenta los mapas de calor horarios, en los que se identifica un descenso progresivo de la temperatura interior durante el periodo nocturno. Los valores medios en esta franja fueron aproximadamente 22 °C en noviembre, 26 °C en diciembre, 27 °C en febrero y 18 °C en agosto. En conjunto, estos resultados muestran que la implementación del SGF reduce la intensidad del sobrecalentamiento diurno y modifica el patrón de enfriamiento interior a lo largo del ciclo diario.

Se compararon los resultados obtenidos mediante simulación térmica en el software SIMEDIF y las mediciones in situ con el objetivo de evaluar el comportamiento térmico del Sistema de Fachada Verde indirecta (SGF) en los Dormitorios 01 y 02. La Tabla 4 presenta el perfil horario de temperatura interior con y sin la implementación del sistema durante los meses de noviembre y diciembre, considerándose ambos métodos de evaluación.

Las mediciones se realizaron bajo las mismas condiciones temporales, se analizaron los primeros y últimos tres días de cada mes a las 14:00 y 20:00 horas, correspondientes

FECHA	DORMITORIO 01 SIN SGF		DORMITORIO 01 CON SGF	
	14:00PM	20:00PM	14:00PM	20:00 PM
01/11/2025	22.8°C	21.5°C	21.2°C	19.4°C
02/11/2025	23.6°C	21.9°C	22.3°C	20.9°C
03/11/2025	22.5°C	20.9°C	21.5°C	19.2°C
28/11/2025	24.9°C	23.5°C	22.7°C	21.3°C
29/11/2025	24.2°C	22.8°C	22.2°C	21.4°C
30/11/2025	25.3°C	24.8°C	23.4°C	22.8°C
01/12/2025	24.4°C	22.6°C	22,3°C	20.9°C
02/12/2025	24.8°C	23.6°C	23,2°C	22.5°C
03/12/2025	25.5°C	22.9°C	23.5°C	22.9°C

Tabla 4. Comparación de temperaturas con y sin SGF, mediante medición in situ en noviembre y diciembre. Fuente: Elaboración de los autores.

FECHA	DORMITORIO 01 SIN SGF SIMEDIF		DORMITORIO 01 CON SGF SIMEDIF	
	14:00PM	20:00PM	14:00PM	20:00 PM
01/11/2025	23.7°C	23.1°C	22.24°C	22.04°C
02/11/2025	23.83°C	22.96°C	22.36°C	21.89°C
03/11/2025	24.12°C	23.49°C	22.34°C	22.06°C
28/11/2025	28.03°C	27.39°C	25.43°C	25.51°C
29/11/2025	27.54°C	26.97°C	25.3°C	25.08°C
30/11/2025	27.14°C	26.32°C	24.89°C	24.63°C
01/12/2025	28.05°C	27.41°C	25.44°C	24.27°C
02/12/2025	27.88°C	26.87°C	25.51°C	25.13°C
03/12/2025	26.65°C	26.33°C	24.69°C	24.59°C

Tabla 5. Comparación de temperaturas con y sin sistema de fachada verde (SGF) en el Dormitorio 01 mediante simulación en SIMEDIF. Fuente: Elaboración de los autores.

al periodo de máxima carga térmica diurna y al periodo nocturno de liberación del calor acumulado. En ambos métodos se registraron temperaturas interiores menores en el escenario con SGF respecto al caso sin intervención (Tabla 4 y Tabla 5).

En las mediciones *in situ*, la diferencia promedio de temperatura interior entre ambos escenarios fue cercana a 2 °C, se alcanzaron reducciones máximas de hasta 3 °C, con mayores diferencias registradas en horario nocturno.

Por su parte, la simulación desarrollada en SIMEDIF evidenció disminuciones comprendidas entre 1 °C y 2.5 °C, manteniéndose un comportamiento térmico similar en los horarios evaluados y variaciones leves entre los días analizados. Durante el mes de noviembre se observaron las mayores diferencias térmicas, principalmente en horas de la tarde.

De manera general, ambos métodos muestran una tendencia consistente hacia menores temperaturas

interiores asociadas a la incorporación del SGF en todos los casos evaluados (Tabla 4 y Tabla 5).

DISCUSIONES

La simulación térmica desarrollada en SIMEDIF permitió identificar el comportamiento del sistema indirecto de fachada verde frente al sobrecalentamiento en la vivienda analizada. En el escenario base, el Dormitorio 01 presentó la condición más crítica, con temperaturas máximas de hasta 32.5 °C en febrero, mientras que la incorporación del sistema produjo una reducción aproximada de 3 °C. Este desempeño sugiere que el sistema atenúa la ganancia térmica a través del sombreado vegetal y del efecto amortiguador de la cámara de aire, que contribuyen a moderar la temperatura interior. Este comportamiento coincide con lo señalado por Manso y Castro-Gomes (2015), quienes indican que los sistemas de muros verdes mejoran el microclima de la envolvente mediante la provisión de sombra, el aislamiento complementario y el enfriamiento evaporativo generado por la vegetación. Asimismo, Perini et al. (2011) sostienen que la presencia de una capa de aire entre la cobertura vegetal y la fachada puede incrementar la resistencia térmica de la envolvente y reducir la transferencia de calor hacia los espacios interiores, reforzando el efecto de protección térmica observado en el presente estudio.

Las mediciones in situ confirmaron una disminución térmica durante las horas de mayor exigencia, con reducciones cercanas a 2 °C, manteniendo una tendencia consistente con la simulación. Esta correspondencia refuerza la solidez del comportamiento observado y coincide con lo reportado por Suárez et al. (2020) sobre la capacidad de las fachadas verdes para reducir la transferencia de calor hacia el interior. De manera similar, Padovan et al. (2022) registraron una reducción promedio de 4.4 °C en la temperatura interior del aire, con disminuciones máximas de hasta 7.3 °C en ambientes protegidos mediante una fachada verde indirecta. Asimismo, Susorova et al. (2013) señalan que la vegetación reduce la temperatura superficial de la fachada y limita la transferencia de calor por conducción hacia el interior del edificio, contribuyendo a disminuir las cargas térmicas en los espacios protegidos. En este marco, los hallazgos respaldan la hipótesis de investigación al mostrar que las fachadas verdes pueden reducir la ganancia térmica en viviendas autoconstruidas, aunque su eficacia depende de variables de contexto como la radiación incidente, la orientación y la ventilación. A diferencia de estudios previos desarrollados con sistemas más industrializados, este caso demuestra que es posible obtener mejoras térmicas medibles mediante soluciones de baja complejidad constructiva y con materiales localmente disponibles. Esta observación resulta consistente con Perini et al. (2011), quienes señalan que los sistemas indirectos de fachada verde pueden implementarse

mediante diversas estructuras de soporte y materiales, manteniendo beneficios térmicos sobre la envolvente sin requerir necesariamente sistemas modulares complejos o de alta tecnología.

Las limitaciones del estudio deben considerarse al interpretar sus resultados. En el plano metodológico, la evaluación se concentró en un número reducido de ambientes, lo que restringe el alcance de la generalización. En el plano instrumental, el análisis se basó principalmente en la temperatura del aire, sin incorporar variables adicionales de confort térmico, como humedad relativa, velocidad del aire o temperatura radiante. A ello se suma que la simulación empleó parámetros estandarizados que simplifican la complejidad del entorno urbano, por lo que pueden persistir diferencias entre el comportamiento modelado y el comportamiento real del sistema.

Desde el punto de vista constructivo, la implementación del prototipo permitió identificar diferencias relevantes entre los materiales empleados. El uso de bambú de 3 pulgadas presentó limitaciones asociadas al peso del sistema, que dificultaron su aplicación en edificaciones precarias, mientras que el bambucillo de 1 1/2 pulgada mostró una mejor adecuación como alternativa estructural ligera. Esta observación no solo tiene implicancias prácticas para la viabilidad del sistema, sino que también amplía la discusión sobre la adaptabilidad de las fachadas verdes en contextos de autoconstrucción y restricciones estructurales.

En conjunto, el estudio demuestra que el sistema de fachada verde puede mejorar el desempeño térmico de viviendas de bajo costo mediante una estrategia pasiva técnicamente viable y constructivamente adaptable. Su principal contribución radica en aportar evidencia cuantitativa sobre el comportamiento del sistema en un clima húmedo-costero como el de San Martín de Porres, Lima, donde la efectividad de estas soluciones ha sido poco explorada. Asimismo, la incorporación de bambucillo como alternativa liviana ofrece un aporte aplicado al diseño de soluciones pasivas replicables en contextos urbanos similares.

CONCLUSIONES

La evaluación del sistema indirecto de fachada verde (SGF) evidenció una mejora del comportamiento térmico interior respecto al escenario sin intervención. En el modelo base, las simulaciones mostraron temperaturas interiores máximas de hasta 32.5 °C en febrero, el mes más cálido, en espacios orientados a ESE, con picos entre las 14:00 y 18:00 hrs. Tras la implementación del SGF, se registró una reducción de las temperaturas máximas de hasta 7.7 % en la sala y valores similares en los dormitorios, junto con una mayor estabilidad térmica. Este efecto fue más notorio durante las horas de mayor

carga térmica (14:00–16:00 h), al atenuar los picos de sobrecalentamiento.

La comparación entre las simulaciones térmicas y las mediciones in situ mostró una tendencia coherente. En el dormitorio evaluado, el SGF redujo la temperatura interior en aproximadamente 2 °C en condiciones reales, mientras que la simulación en SIMEDIF indicó una disminución cercana a 3 °C. Esta diferencia se debe a que el modelo asume una cobertura vegetal completamente desarrollada, mientras que en campo la vegetación se encontraba en una etapa de crecimiento intermedia, lo que atenúa el efecto térmico observado.

En los meses de invierno, el sistema contribuyó a mantener temperaturas interiores más estables, con valores comprendidos entre 20.5 °C y 21.4 °C, evitándose descensos bruscos durante el periodo nocturno, donde se registraron mínimos cercanos a 18 °C. Este comportamiento sugiere que el SGF no solo reduce el sobrecalentamiento estival, sino que también favorece una mayor estabilidad térmica estacional.

En este contexto, la implementación de estrategias pasivas como el sistema indirecto de fachada verde representa una alternativa accesible para mejorar las condiciones de habitabilidad en viviendas autoconstruidas de alta densidad urbana, donde las limitaciones técnicas y económicas dificultan la incorporación de soluciones más complejas. Su aplicación permite reducir la carga térmica interior y disminuir la dependencia de sistemas mecánicos de climatización.

Finalmente, la principal contribución de este estudio radica en demostrar que un sistema de fachada verde puede mejorar el comportamiento térmico de viviendas autoconstruidas de bajo costo, que aportan evidencia aplicada para el desarrollo de estrategias pasivas de acondicionamiento ambiental. Asimismo, el trabajo amplía el conocimiento sobre el desempeño de estos sistemas en climas húmedos costeros, como el de Lima, donde su eficacia suele reportarse como más limitada en comparación con otros contextos climáticos, pero donde, aun así, se identificaron mejoras térmicas cuantificables.

Adicionalmente, el estudio incorpora el uso de bambucillo como una alternativa viable para estructuras livianas, lo que incrementa la factibilidad constructiva del sistema en viviendas con restricciones estructurales. En conjunto, estos hallazgos aportan criterios técnicos y constructivos que pueden orientar el diseño, adaptación e implementación de soluciones pasivas en entornos urbanos con características edilicias y climáticas similares.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, A.E.A. y A.T.H.; Curación de datos, A.E.A. y A.T.H.; Análisis formal, A.E.A. y A.T.H.; Adquisición de financiación A.E.A. y A.T.H.; Investigación, A.E.A. y A.T.H.; Metodología, A.E.A. y A.T.H. y V.M.A.; Administración de proyecto; Recursos; Software. A.E.A. y A.T.H.; Supervisión, V.M.A.; Validación, V.M.A.; Visualización, V.M.A.; Escritura – borrador original, A.E.A., A.T.H. y V.M.A.; Escritura – revisión y edición, A.E.A. y A.T.H. y V.M.A.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdeen, N., & Rafaat, T. (2024). Assessing vertical green walls for indoor corridors in educational buildings and its impact outdoor: A field study at the universities of Canada in Egypt. *Results in Engineering*, 21, 101838. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101838>
- Barros, P. P. M., & Menacho Casimiro, E. E. (2014). Modificaciones térmicas en Lima: Análisis de la isla de calor urbana. *Anales Científicos*, 75(1), 90–99. <https://doi.org/10.21704/ac.v75i1.952>
- Bustami, R. A., Belusko, M., Ward, J., & Beecham, S. (2018). Vertical greenery systems: A systematic review of research trends. *Building and Environment*, 146, 226–237. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.09.045>
- Domínguez Cicorio, C. E., García Solorzano, L. A., & Ruíz Torres, R. P. (2022). Monitoreo térmico de barrera vertical con vegetación, evaluando el desempeño a través de la experimentación y herramienta de simulación. *Revista de ciencias tecnológicas*, 5(1), e94. <https://recit.uabc.mx/index.php/revista/article/view/94>
- El Menshawy, A. S., Mohamed, A. F., & Fathy, N. M. (2022). A comparative study on green wall construction systems: Case study of South Valley campus of AASTMT. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00808. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00808>
- Faragallah, R. N., & Ragheb, R. A. (2022). Evaluation of thermal comfort and urban heat island through cool paving materials using ENVI-Met. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 101609. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2021.10.004>
- Gómez, A., Esenarro, D., Martínez, P., Vilchez, S., & Raymundo, V. (2023). Thermal Calculation for the Implementation of Green Walls as Thermal Insulators on the East and West Facades in the Adjacent Areas of the School of Biological Sciences, Ricardo Palma University (URP) at Lima, Peru 2023. *Buildings*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/buildings13092301>

Lesjak, V., Pajek, L., & Košir, M. (2020). Indirect green façade as an overheating prevention measure. *Gradevinar*, 72(7), 569–583. <https://doi.org/10.14256/JCE.2797.2019>

Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 863–871. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.07.203>

Marchioretto, J., Pereira Junior, A. C., Nozawa, I. A., & Fontes, M. S. G. de C. (2023). Fachadas verdes: potencial de sombreamento e atenuação solar da espécie *Merremia dissecta*. *Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído*, 17(1), 1–10. <https://doi.org/10.46421/encac.v17i1.3848>

Padovan, L. D. G., Fontes, M. S. G. de C., & Barbosa, M. C. (2022). Influência térmica da fachada verde no ambiente interno. *PARC: Pesquisa Em Arquitetura E Construção*, 13, e022005. <https://doi.org/10.20396/parc.v13i00.8661203>

Perini, K., Ottelé, M., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Greening the building envelope, facade greening and living wall systems. *Open Journal of Ecology*, 1(1), 1–8. <http://www.doi.org/10.4236/oje.2011.11001>

Ramadhan, A. M., & Mahmoud, A. H. (2023). Evaluating the efficiency of a living wall façade as a sustainable energy-saving alternative in hot arid regions. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(96), 1–25. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00259-9>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI]. (s.f.). Ministerio del Ambiente Pronóstico del Tiempo a nivel Nacional. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-meteorologico>

Soberón Forsberg, V. S., & Obregón Párraga, E. (2016). Identificación de islas de calor en la ciudad de Lima Metropolitana utilizando imágenes del satélite landsat 5TM. *Anales Científicos*, 77(1), 34–44. <https://doi.org/10.21704/ac.v77i1.475>

Suárez, P. A., Cantón, M. A., & Correa, É. (2020). Desempeño térmico de fachadas verdes tradicionales de orientación este en viviendas seriadas emplazadas en climas áridos. *Revista Hábitat Sustentable*, 10(2), 82–93. <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.06>

Suárez, P., Cantón, M. A., & Correa, É. (2023). Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros mäsicos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas. *Cuaderno Urbano*, 35(35). <https://doi.org/10.30972/crn.35356773>

Susorova, I., Angulo, M., Bahrami, P., & Brent Stephens. (2013). A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Building and Environment*, 67, 1–13. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2013.04.027>

Tudiwer, D., & Korjenic, A. (2017). The effect of living wall systems on the thermal resistance of the façade. *Energy and Buildings*, 135, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.023>