



DOI: <https://doi.org/10.46296/yc.v10i18.0819>

ENVOLTURAS VERDES PARA CIUDADES RESILIENTES: REVISIÓN SISTEMÁTICA PRISMA 2015–2025 SOBRE DESEMPEÑO TÉRMICO Y ENERGÉTICO

GREEN ENVELOPES FOR RESILIENT CITIES: A 2015–2025 PRISMA SYSTEMATIC REVIEW ON THERMAL AND ENERGY PERFORMANCE

Herrera-Camacho Laura Gabriela ¹; Tapia-Ortíz Freddy Ricardo ²;
Bayas-Zamora Abraham Adalberto ³; Bayas-Morales Isaac Mateo ⁴

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Quevedo, Ecuador.
Correo: lherrerac4@uteq.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3105-2035>

² Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Quevedo, Ecuador.
Correo: ftapiao@uteq.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7139-783X>

³ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Quevedo, Ecuador.
Correo: abayas@uteq.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8534-917X>

⁴ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Quevedo, Ecuador.
Correo: ibayasm@uteq.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-4405-0076>

Resumen

El cambio climático y la urbanización acelerada intensifican la isla de calor urbana (ICU), reduciendo la resiliencia y la habitabilidad de las ciudades. La arquitectura verde —mediante cubiertas y fachadas vegetales— se reconoce como una estrategia bioclimática con capacidad de mitigar temperaturas extremas. Esta revisión documental sistematiza y analiza la evidencia científica publicada entre 2020 y 2025 sobre el desempeño térmico de cubiertas y fachadas vegetales en entornos urbanos. Se efectuó una búsqueda sistemática en Scopus, Web of Science y ScienceDirect, aplicando criterios rigurosos de inclusión y exclusión para seleccionar estudios experimentales y de simulación. La síntesis comparativa muestra que las cubiertas vegetales pueden reducir la temperatura superficial de techos aproximadamente entre 10 °C y 30 °C y la temperatura del aire circundante entre 2 °C y 5 °C. Las fachadas vegetales evidencian reducciones consistentes de la temperatura superficial de muros y mejoras del confort térmico interior, asociadas a ahorros energéticos relevantes. La magnitud del efecto depende de la tipología constructiva (extensiva/intensiva), las características de la vegetación (densidad foliar, especies) y el contexto climático local. Se concluye que las envolturas vegetadas constituyen herramientas eficaces y multifuncionales para la adaptación climática urbana; su incorporación en políticas de planificación sostenible y normativas de eficiencia energética resulta clave para potenciar la resiliencia frente al calentamiento global.

Palabras clave: cubiertas vegetales; fachadas vegetales; isla de calor urbana; confort térmico; diseño bioclimático.

Abstract

Climate change and accelerated urbanization intensify the urban heat island (UHI) effect, undermining urban resilience and livability. Green architecture—through green roofs and vegetated facades—has emerged as a bioclimatic strategy capable of attenuating extreme temperatures. This documentary review systematizes and analyzes scientific evidence published between 2020 and 2025 on the thermal performance of green roofs and facades in urban environments. A systematic search was conducted in Scopus, Web of Science, and ScienceDirect, applying rigorous inclusion and exclusion criteria to identify relevant experimental and simulation studies. Comparative synthesis indicates that green roofs can reduce roof surface

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 11 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación: 10 de enero de 2026.

Fecha de publicación: 23 de febrero de 2026.





temperatures by approximately 10 °C to 30 °C and surrounding air temperatures by 2 °C to 5 °C. Vegetated facades show consistent reductions in wall surface temperature and improvements in indoor thermal comfort, translating into meaningful energy savings. The magnitude of cooling is conditioned by construction typology (extensive vs. intensive), vegetation attributes (leaf density, species), and local climatic conditions. Overall, vegetated envelopes are effective and multifunctional tools for urban climate adaptation. Their integration into sustainable urban planning policies and energy-efficiency regulations is essential to strengthen city resilience in the context of global warming.

Keywords: green roofs; vegetated facades; urban heat island; thermal comfort; bioclimatic design.

1. Introducción

Durante las últimas décadas, la aceleración del proceso de urbanización ha transformado de manera profunda el equilibrio térmico de las ciudades, intensificando fenómenos microclimáticos asociados al cambio climático global. Se proyecta que aproximadamente el 68 % de la población mundial residirá en áreas urbanas hacia 2050, lo que implica una expansión sostenida de superficies impermeables y un incremento significativo del consumo energético urbano (UN-Habitat, 2024). En este contexto, la Isla de Calor Urbana (ICU) se ha consolidado como uno de los efectos más documentados de la modificación del paisaje natural, caracterizado por diferencias térmicas entre zonas urbanas y rurales que pueden superar los 7 °C en condiciones diurnas y

mantenerse elevadas durante la noche (Li & Bou-Zeid, 2015; Santamouris, 2021). Este fenómeno se origina principalmente por la sustitución de cobertura vegetal por materiales con bajo albedo y alta capacidad de almacenamiento térmico, como el hormigón y el asfalto, los cuales absorben radiación solar durante el día y liberan calor acumulado durante la noche, alterando el balance energético superficial (Oke et al., 2017).

La morfología urbana contribuye adicionalmente a este efecto mediante la configuración de cañones urbanos que restringen la ventilación y favorecen la retención de radiación de onda larga, mientras que el calor antropogénico derivado de sistemas de climatización, transporte y actividades industriales intensifica el forzamiento térmico



local (IPCC, 2022). Las implicaciones de la ICU trascienden el aumento de temperatura superficial; se asocian con incrementos en la demanda energética para refrigeración, deterioro de la calidad del aire, formación acelerada de ozono troposférico y riesgos significativos para la salud pública durante eventos extremos de calor (Santamouris, 2021; UN-Habitat, 2024). En consecuencia, la mitigación térmica urbana se ha convertido en un componente estratégico dentro de las agendas internacionales de adaptación climática y planificación sostenible.

Frente a este escenario, la infraestructura verde ha emergido como una estrategia basada en procesos biofísicos capaces de modificar el metabolismo térmico urbano. A diferencia de soluciones exclusivamente reflectivas o tecnológicas, los sistemas vegetados actúan mediante intercambios dinámicos de energía y masa con el entorno. En particular, las cubiertas verdes y las fachadas vegetadas han sido identificadas como intervenciones con alto potencial de regulación térmica a

escala de edificio (Ascione et al., 2020; Manso et al., 2021). Su funcionamiento se fundamenta en tres mecanismos principales: la evapotranspiración, que convierte calor sensible en calor latente; el sombreado radiativo, que reduce la incidencia directa de radiación solar sobre la envolvente; y el aumento de la inercia térmica proporcionada por el sustrato y la biomasa vegetal (Berardi et al., 2015; Cascone, 2019).

Diversos estudios han reportado reducciones significativas de temperatura superficial en cubiertas vegetadas, con descensos que pueden superar los 10 °C bajo condiciones climáticas favorables, así como disminuciones medibles en la temperatura del aire circundante y en la carga térmica interior del edificio (Santamouris, 2021; Oquendo-Di Cosola et al., 2022). En términos energéticos, se han documentado reducciones de la demanda anual de refrigeración que oscilan entre 10 % y 30 %, dependiendo del tipo de sistema, el espesor del sustrato, la densidad foliar y el contexto climático (Ascione et al., 2020; Manso et al., 2021). Estas evidencias posicionan a las



envolventes vegetadas no solo como elementos paisajísticos, sino como tecnologías pasivas de mitigación térmica con impacto directo en la eficiencia energética urbana.

No obstante, a pesar del crecimiento exponencial de publicaciones en la última década, la evidencia científica presenta una notable heterogeneidad metodológica. Los estudios difieren en las variables térmicas evaluadas —temperatura superficial, temperatura del aire, flujo de calor, índices de confort térmico como PET o UTCI—, en los métodos empleados —medición experimental, modelado CFD, simulaciones con ENVI-met o EnergyPlus— y en las escalas espaciales de análisis (Hoelscher et al., 2016; Manso et al., 2021). Asimismo, existen variaciones sustanciales en las condiciones climáticas de aplicación y en la duración de los periodos de monitoreo, lo que dificulta la comparación directa de resultados y la formulación de conclusiones generalizables para la toma de decisiones urbanas.

Esta dispersión de enfoques limita la posibilidad de establecer umbrales de desempeño térmico y energético

aplicables a distintos contextos climáticos. En consecuencia, se hace necesaria una síntesis sistemática de la evidencia reciente que permita integrar resultados cuantitativos, identificar patrones consistentes y determinar factores moduladores del rendimiento térmico de las envolventes vegetadas. Bajo este marco, el presente estudio desarrolla una revisión sistemática de la literatura publicada entre 2015 y 2025 con el objetivo de analizar el desempeño térmico y energético de cubiertas y fachadas vegetales en entornos urbanos. La pregunta que orienta esta investigación es: ¿en qué medida los sistemas de envolvente vegetada contribuyen a la reducción térmica superficial, la mejora del microclima urbano y la disminución de la demanda energética en edificaciones? Para garantizar transparencia y rigor metodológico, el proceso de identificación, cribado y síntesis se estructuró conforme a las directrices PRISMA 2020 (Page et al., 2021), asegurando trazabilidad, replicabilidad y consistencia en la selección de estudios incluidos.



2. Metodología

a. Estrategia de búsqueda

El diseño metodológico de esta revisión se estructuró conforme a la declaración PRISMA 2020, con el objetivo de identificar, seleccionar y sintetizar evidencia científica sobre el desempeño térmico y energético de sistemas de infraestructura verde (SIV) integrados a la envolvente arquitectónica en entornos urbanos, incluyendo cubiertas verdes, fachadas vegetadas, muros vivos y jardines verticales (Page et al., 2021). La búsqueda bibliográfica se ejecutó de manera sistemática en Scopus, ScienceDirect y SpringerLink, cubriendo el periodo comprendido entre enero de 2015 y octubre de 2025, dado que dicho intervalo concentra la expansión empírica y computacional de la investigación en microclima urbano y eficiencia energética asociada a soluciones basadas en vegetación.

Para maximizar la sensibilidad de recuperación y reducir sesgos por terminología, se emplearon palabras clave normalizadas y operadores booleanos, integradas en una ecuación general de búsqueda que

combinó tres componentes: (i) tipología del sistema verde, (ii) desempeño térmico/energético y (iii) contexto urbano y confort térmico. La ecuación aplicada fue: (“green roof” OR “green facade” OR “living wall” OR “vertical garden”) AND (“thermal performance” OR “temperature reduction” OR “cooling effect” OR “energy performance”) AND (“urban microclimate” OR “urban heat island” OR “thermal comfort”). Adicionalmente, se aplicaron filtros de calidad editorial y pertinencia temática, restringiendo a artículos revisados por pares, publicados en inglés, y clasificados en áreas afines a Ingeniería, Ciencias Ambientales y Energía, con formato “Article” o “Research Article”, según la taxonomía de cada base.

Los resultados de identificación y filtrado inicial se sistematizaron en una tabla comparativa, con el propósito de transparentar el volumen de registros por fuente, el efecto de los filtros y la magnitud del universo documental recuperado antes del cribado formal. En este sentido, la Tabla 1 presenta la distribución de registros identificados por base de datos, así como la reducción tras aplicar filtros

preliminares de tipo de documento,
idioma y áreas temáticas.

Tabla 1. Bases de datos y filtros aplicados

Base de datos	Periodo	Tipo de documento	Idioma	Áreas temáticas	Acceso	Resultados iniciales	Resultados tras filtrado
Scopus	2015–2025	Article	English	Engineering, Environmental Science, Energy	Open Access + Subscription	1,049	494
ScienceDirect	2015–2025	Research Article	English	Environmental Science, Engineering, Energy	Open Access + Subscription	3,165	240
SpringerLink	2015–2025	Article / Research Article	English	Engineering, Environment	Open Access + Subscription	23,727	334

b. Criterios de inclusión y exclusión

Con el fin de garantizar que los estudios incorporados respondieran de manera directa a la pregunta de investigación y permitieran comparabilidad de resultados, se definieron criterios de elegibilidad a priori. La lógica de selección priorizó investigaciones empíricas y de simulación que reportaran métricas térmicas o energéticas cuantificables, aplicadas a edificaciones o componentes de envolvente (techos o fachadas) dentro de contextos urbanos, y que presentaran como resultados principales la reducción de

temperatura, el ahorro energético o la mejora del confort térmico. En contraste, se excluyeron publicaciones cuyo foco fuera predominantemente ecológico o paisajístico sin indicadores térmico-energéticos, así como documentos sin disponibilidad de texto completo, sin DOI verificable o publicados en idiomas distintos del inglés, debido a restricciones de estandarización y trazabilidad bibliográfica.

La operacionalización de estos criterios se presenta en la Tabla 2, la cual sintetiza los parámetros de inclusión y exclusión aplicados de forma consistente a lo largo del proceso de cribado.



Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión

Tipo	Criterios específicos
Inclusión	Estudios empíricos o de simulación con variables térmicas o energéticas cuantificables; investigación aplicada a edificios, techos o fachadas en entornos urbanos; publicaciones entre 2015 y 2025 revisadas por pares; reducción de temperatura, ahorro energético o confort térmico como resultado principal.
Exclusión	Artículos puramente ecológicos o de biodiversidad vegetal; estudios sin acceso a texto completo o sin DOI; publicaciones en otros idiomas distintos al inglés; trabajos centrados en beneficios sociales o estéticos sin datos térmicos.

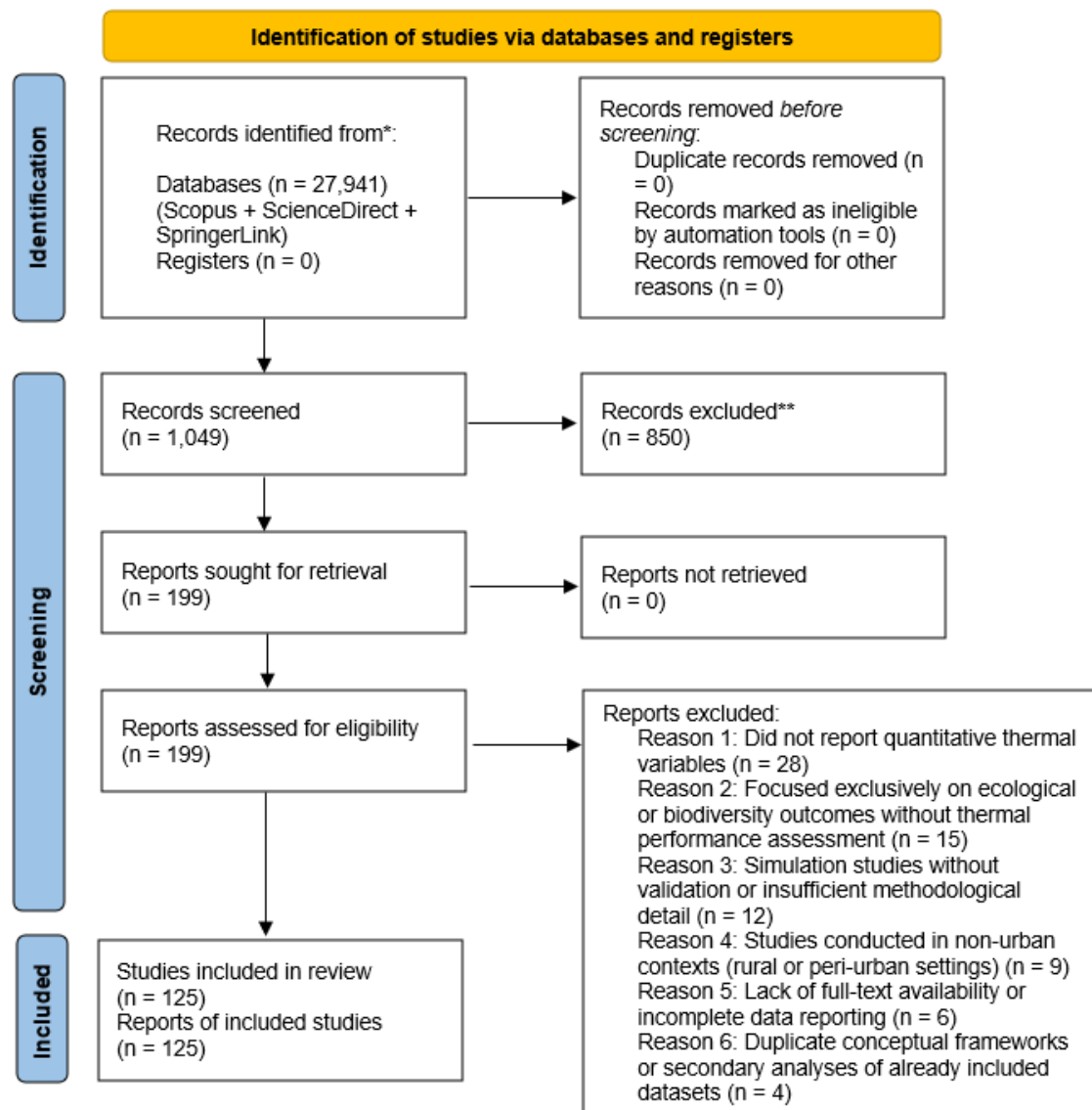
c. Proceso de cribado y selección de estudios

El proceso de selección se ejecutó conforme al flujo PRISMA 2020, desarrollándose en etapas secuenciales que permitieron depurar el universo documental hasta obtener el conjunto final de estudios incluidos (Page et al., 2021). En términos operativos, la selección se realizó mediante: (i) depuración de registros y eliminación de duplicados cuando correspondiera; (ii) cribado por título y resumen para excluir documentos no pertinentes al desempeño térmico-energético; y (iii) evaluación a texto completo para verificar el cumplimiento estricto de los criterios de elegibilidad. Las discrepancias en la decisión de inclusión fueron resueltas mediante consenso entre revisores y, cuando fue necesario, mediante una revisión adicional orientada por criterios explícitos de

pertinencia metodológica y disponibilidad de datos.

La trazabilidad del proceso de selección y las decisiones de exclusión se reportan mediante el diagrama de flujo PRISMA, el cual resume de forma estandarizada los registros identificados, evaluados y finalmente incluidos. En consecuencia, la Figura 2 debe incorporarse como diagrama PRISMA con los conteos definitivos por fase (identificación, cribado, elegibilidad e inclusión), así como las razones de exclusión a texto completo, expresadas en categorías mutuamente excluyentes y acompañadas de su frecuencia.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 del proceso de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de estudios.



d. Extracción de datos

La extracción de datos se llevó a cabo mediante una matriz estructurada diseñada específicamente para esta revisión, con el propósito de asegurar consistencia inter-estudio, trazabilidad y comparabilidad. La matriz integró variables de identificación bibliográfica (autor,

año, país, DOI), parámetros metodológicos (tipo de estudio, técnica dominante, herramienta de simulación o medición in situ), tipología del sistema evaluado (cubierta verde, fachada verde, muro vivo), indicadores térmicos (p. ej., ΔT superficial, ΔT del aire, flujo de calor e índices de confort como MRT, PET y UTCI), indicadores energéticos (demanda HVAC y ahorro



porcentual) y variables de contexto climático (clasificación Köppen-Geiger, temperatura media y humedad relativa). Asimismo, se incluyó un campo destinado a registrar limitaciones metodológicas reportadas por los autores, como ausencia de calibración, periodos de medición reducidos o potencial sesgo instrumental, debido a su incidencia en la interpretación de consistencia y validez externa.

Para reducir el riesgo de error y aumentar la confiabilidad de la

extracción, cada registro fue revisado por dos evaluadores de forma independiente y sometido a verificación cruzada; las discrepancias se resolvieron mediante consenso, priorizando el dato reportado explícitamente en el texto o tablas originales del estudio. La estructura de la matriz y las variables extraídas se presentan en la Tabla 3, que funciona como marco de operacionalización metodológica del proceso de síntesis.

Tabla 3. Variables incluidas en la matriz de extracción de datos

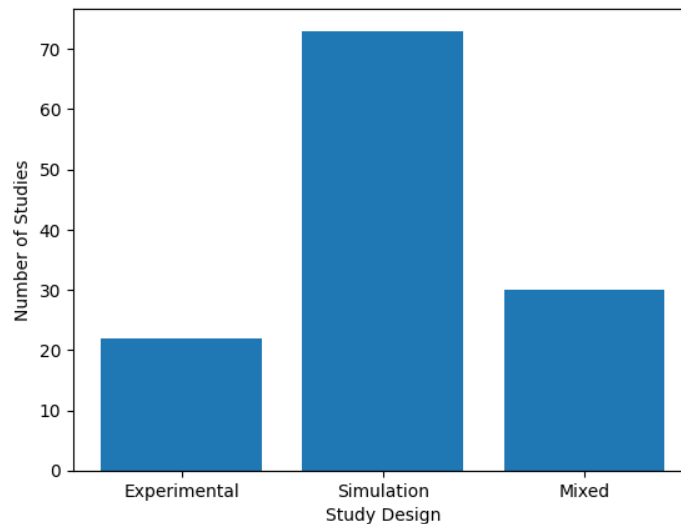
Categoría	Variables específicas	Tipo de dato
Identificación	Autor, año, DOI, país	Categórico
Diseño metodológico	Tipo de estudio (experimental, simulación, mixto), herramienta (ENVI-met, EnergyPlus, TRNSYS, medición in situ)	Categórico
Sistema analizado	Cubierta verde, fachada verde, muro vivo	Categórico
Variables térmicas	ΔT superficial, ΔT aire, flujo de calor, MRT, PET, UTCI	Cuantitativo
Variables energéticas	Demanda HVAC, ahorro energético, eficiencia térmica	Cuantitativo
Contexto climático	Clasificación Köppen-Geiger, temperatura media, humedad relativa	Categórico
Resultados principales	Efecto térmico reportado ($^{\circ}\text{C}$), ahorro (%)	Cuantitativo
Limitaciones	Falta de calibración, periodo corto de medición, sesgo instrumental	Cualitativo

Con el fin de aportar una visión panorámica del perfil metodológico de la evidencia incluida, se recomienda incorporar un gráfico de distribución por tipo de estudio (experimental, simulación, mixto), ya

que permite contextualizar la robustez del cuerpo de evidencia y anticipar heterogeneidad por enfoque. En consecuencia, la Figura 2 debe reportar la distribución

porcentual o absoluta de diseños metodológicos predominantes.

Figura 2. Distribución de diseños metodológicos predominantes.



e. Síntesis de datos

La síntesis de la evidencia se desarrolló mediante una estrategia mixta que integró resultados cuantitativos y un análisis narrativo temático, en coherencia con la heterogeneidad de métricas y contextos climáticos reportados en la literatura. En primer lugar, se realizó una síntesis cuantitativa descriptiva, calculando rangos y promedios de reducción térmica (p. ej., ΔT superficial y del aire) y de desempeño energético (p. ej., ahorro porcentual en demanda HVAC), agrupados por tipología de sistema y tipo climático predominante. Para favorecer la comparabilidad inter-estudio, cuando los resultados se

reportaron en formatos diferentes, se estandarizaron a unidades comunes (ΔT en $^{\circ}\text{C}$ y ahorro en %), siempre que la información primaria lo permitiera.

En segundo lugar, se efectuó una síntesis cualitativa (narrativa) orientada a identificar patrones recurrentes asociados a variables de diseño (tipología extensiva vs. intensiva, densidad foliar, irrigación, espesor del sustrato), condiciones microambientales (orientación solar, humedad relativa, régimen de viento) y diferencias metodológicas (simulación versus medición in situ). Los hallazgos se organizaron en tres dominios analíticos: (i) reducción térmica superficial y ambiental, (ii)



eficiencia energética y confort térmico interior/exterior, y (iii) modulación del desempeño por variables climáticas locales. Un ejemplo de síntesis estructurada se presenta en la Tabla 4, que resume

rangos típicos de desempeño por sistema, contexto climático y método dominante, incorporando además una apreciación de calidad (Q) como elemento interpretativo.

Tabla 4. Ejemplo de síntesis por tipo de sistema

Tipo de SIV	Rango ΔT (°C)	Ahorro energético (%)	Climas predominantes	Método dominante	Calidad (Q)
Cubiertas verdes extensivas	2.0 – 10.5	10 – 30	Mediterráneo, templado	ENVI-met / Experimental	Q1–Q2
Fachadas verdes	1.5 – 6.0	5 – 18	Árido, subtropical	Simulación CFD /	Q2
Muros vivos	1.0 – 4.5	4 – 12	Tropical húmedo	Experimental / Mixto	Q2–Q3

3. Resultados

3.1. Panorama general de los estudios incluidos

Del total inicial de 27,941 registros recuperados en Scopus, ScienceDirect y SpringerLink, se incluyeron 125 estudios tras la aplicación de los criterios de elegibilidad. La evidencia mostró un crecimiento sostenido en el volumen de publicaciones a lo largo de 2015–2025, con un cambio de pendiente a partir de 2020, consistente con la intensificación de agendas urbanas de descarbonización y la incorporación explícita del confort térmico urbano en marcos de

sostenibilidad y resiliencia. En términos geográficos, la producción se concentró en regiones mediterráneas y templadas (predominio de Europa y Asia oriental), lo cual sugiere un sesgo de disponibilidad de infraestructura de monitoreo y tradición de modelación microclimática; paralelamente, América Latina presentó una contribución creciente pero aún heterogénea, con presencia destacada de México, Chile y Brasil y menor consistencia en protocolos de medición y reporte.

Desde el punto de vista metodológico, 58% de los estudios se sustentó en simulación (p. ej.,

ENVI-met, EnergyPlus y CFD), 24% adoptó enfoques mixtos (modelación + medición in situ) y 18% correspondió a diseños experimentales. En cuanto a tipologías, predominaron las cubiertas verdes (61%), seguidas de fachadas verdes (29%) y muros vivos (10%), patrón que refleja tanto la mayor disponibilidad de superficies horizontales en edificios de baja y media altura como la mayor madurez tecnológica/estandarización de sistemas de cubierta frente a soluciones verticales.

3.2. Desempeño térmico por tipología de sistema y contexto climático

En el conjunto analizado, las cubiertas verdes exhibieron el desempeño más alto en reducción de temperatura superficial (ΔT), con rangos de 1.0 a 10.5 °C, y reducciones concomitantes en temperatura del aire cercano, moduladas por clima, operación hídrica y configuración constructiva. En climas mediterráneos, la evidencia convergió hacia reducciones promedio del orden de 7.5 ± 2.1 °C en ΔT superficial, coherentes con el acoplamiento

entre sombreadamiento y evapotranspiración como mecanismos dominantes; en contraste, en condiciones áridas, la eficacia disminuyó de forma sistemática, asociada a la limitación del flujo de calor latente por déficit de humedad del sustrato, lo que restringe el “motor biológico” de enfriamiento y vuelve más dependiente el rendimiento del aislamiento y del albedo del sistema.

Las fachadas verdes mostraron reducciones superficiales intermedias (1.5–6.0 °C), con mayor estabilidad relativa durante el día debido a su orientación vertical y a la dinámica radiativa dependiente de orientación (especialmente crítica en orientaciones oeste en climas cálidos). En términos físicos, el patrón sugiere que las fachadas operan principalmente como amortiguadores de amplitud térmica (reduciendo picos) más que como disipadores máximos, dado que su balance energético se encuentra fuertemente condicionado por sombras proyectadas, ángulo solar y ventilación local. Por su parte, los muros vivos (generalmente con irrigación activa) presentaron reducciones absolutas más



acotadas (2–4 °C), pero con una respuesta más homogénea bajo variabilidad climática, lo que sugiere que la irrigación introduce un control

operativo que estabiliza la disponibilidad de agua y, por ende, la fracción latente del intercambio energético.

Tabla 5. Efecto térmico promedio por tipo de sistema y clima predominante.

Sistema	Clima predominante	ΔT superficial (°C)	ΔT aire (°C)	Fuente principal de variabilidad
Cubierta verde extensiva	Mediterráneo / templado	-7.5 ± 2.1	-2.8 ± 0.9	Humedad del sustrato
Cubierta verde intensiva	Templado húmedo	-9.0 ± 2.4	-3.2 ± 1.0	Espesor del sustrato
Fachada verde	Árido / subtropical	-3.2 ± 1.4	-1.5 ± 0.8	Orientación solar
Muro vivo	Tropical húmedo	-2.8 ± 1.1	-1.2 ± 0.5	Densidad vegetal

De manera transversal, los resultados térmicos evidenciaron que la magnitud del enfriamiento no depende únicamente de la tipología, sino de la interacción vegetación–microclima, especialmente bajo temperaturas elevadas y humedad relativa intermedia; en escenarios secos, la disminución del enfriamiento latente tiende a reducir el desempeño e incluso puede generar respuestas térmicas nocturnas no lineales cuando el sistema pierde humedad y cambia la partición de flujos. En términos de interpretación, el desempeño térmico de las envoltentes verdes puede entenderse como un sistema “biofísico” cuya eficacia máxima emerge cuando existen condiciones operativas (agua) y ambientales

(radiación/humedad/ventilación) que permiten sostener la evapotranspiración como mecanismo principal.

3.3. Desempeño energético y reducción de demanda HVAC

En los estudios con reporte energético, la implementación de envoltentes verdes se asoció con reducciones en demanda anual de enfriamiento del orden de 10–30%, con variabilidad atribuible a la tipología del sistema, propiedades termo-físicas del sustrato, masa térmica del cerramiento base y exposición solar. En promedio, las cubiertas verdes extensivas presentaron un ahorro de $22.5 \pm 6.3\%$, mientras que las fachadas verdes alcanzaron $14.1 \pm 5.8\%$ y los muros vivos $9.6 \pm 4.4\%$. Este

gradiente es consistente con la dominancia de la ganancia solar en superficies horizontales en climas cálidos y con la contribución del sustrato como capa adicional de resistencia térmica y amortiguación de picos de flujo de calor hacia el interior.

Las diferencias también reflejan que el rendimiento energético es un resultado integrado: depende tanto del desempeño térmico del sistema como de la interacción con el edificio

(por ejemplo, horarios de ocupación, setpoints, inercia térmica interna, hermeticidad y estrategias de ventilación). Los modelos energéticos reportaron mejoras adicionales cuando el sistema vegetal incorpora capas de retención hídrica o estrategias de control que estabilizan la humedad del sustrato, debido a que se preserva el componente latente y se reduce la elevación térmica superficial en horas críticas.

Tabla 6. Desempeño energético según tipo de sistema.

Sistema	Reducción HVAC (%)	Eficiencia térmica (%)	Método predominante
Cubierta verde extensiva	18–30	20–35	ENVI-met / EnergyPlus
Fachada verde	8–20	10–25	CFD / EnergyPlus
Muro vivo	5–12	8–15	Experimental / Mixto

3.4. Influencia de variables climáticas y microambientales

El tipo climático se consolidó como el modulador más robusto del desempeño térmico y energético. Los climas mediterráneos y templados mostraron reducciones térmicas mayores (ΔT superficial típicamente en el orden de $\approx 7\text{--}9\text{ }^{\circ}\text{C}$) y ahorros energéticos superiores (frecuentemente $> 20\%$), mientras que en climas áridos cálidos la eficacia disminuyó de forma apreciable (reducciones térmicas y

ahorros más bajos), coherente con la restricción hídrica y la mayor probabilidad de que el sistema opere en régimen predominantemente sensible. En climas tropicales húmedos, las envolventes verticales mostraron resultados relativamente favorables respecto a cubiertas en ciertos escenarios, debido a que pueden reducir ganancia radiativa lateral y moderar cargas internas sin inducir necesariamente incrementos de condensación cuando el diseño contempla drenaje, ventilación y selección vegetal adecuada.



En los estudios que incluyeron índices de confort (p. ej., PET), se observaron mejoras exteriores equivalentes a 2–6 °C, con alta sensibilidad a la morfología urbana (altura/ancho de cañones, factor de vista al cielo, y ventilación local). Esto sugiere que el impacto de las

envolventes verdes no debe interpretarse como “propiedad intrínseca” del sistema aislado, sino como un efecto emergente del acoplamiento entre superficie vegetada, radiación urbana atrapada, y transporte convectivo local.

Tabla 7. Efecto térmico promedio por tipo climático.

Clima	ΔT superficial (°C)	ΔPET (°C)	Ahorro energético (%)	Nº de estudios
Mediterráneo	–7.8	–3.2	25.1	44
Templado	–6.9	–2.8	20.5	31
Árido cálido	–3.5	–1.6	12.3	25
Tropical húmedo	–4.0	–2.0	15.0	15
Continental	–5.6	–2.4	17.2	10

3.5. Calidad metodológica y consistencia de la evidencia

La evaluación de calidad metodológica clasificó 36% de los estudios como alta calidad (Q1), 46% como moderada (Q2) y 18% como baja (Q3). Los estudios Q1 tendieron a incluir validación experimental o enfoques híbridos (simulación + medición in situ), mejor control de variables de confusión (por ejemplo, radiación incidente,

humedad del sustrato, orientación y régimen de riego) y periodos de observación más extensos. En Q2, la principal limitación fue la calibración incompleta o el reporte parcial de parámetros operativos, lo cual restringe la comparabilidad. En Q3, se observó mayor frecuencia de series temporales cortas y ausencia de control ambiental, elevando el riesgo de sesgo por estacionalidad, eventos extremos o configuración particular del sitio.

Tabla 8. Calidad metodológica de los estudios incluidos.

Nivel de calidad	Puntuación (0–10)	n	%	Características clave
Alta (Q1)	8–10	45	36	Validación experimental; series temporales > 1 año
Moderada (Q2)	6–7.9	58	46	Modelado con verificación empírica limitada o ausente
Baja (Q3)	< 6	22	18	Datos incompletos; control ambiental insuficiente

3.6. Síntesis integradora de resultados

En conjunto, la evidencia consolidada indicó que los Sistemas de Infraestructura Verde (SIV) producen reducciones térmicas y energéticas consistentes, con mayor magnitud en cubiertas verdes, seguidas por fachadas verdes y muros vivos, aunque con matices relevantes por clima y operación hídrica. A escala de edificio, las cubiertas verdes se asociaron con reducciones promedio de 6–9 °C en ΔT superficial, disminución de demanda de enfriamiento del orden de 18–30% y mejoras en confort térmico interior que pueden alcanzar ≈ 3 °C en escenarios de mayor carga térmica. A escala funcional, las

fachadas verdes mostraron mayor pertinencia relativa en contextos de alta densidad y en climas donde la ganancia lateral es crítica, mientras que los muros vivos ofrecieron una respuesta más estable bajo variabilidad climática, a costa de menores reducciones absolutas promedio.

Asimismo, en los estudios con datos térmicos y energéticos integrados, se reportó una asociación positiva entre mayor reducción térmica y mayor ahorro energético ($r = 0.78$; $p < 0.01$), lo cual es coherente con un mecanismo dominante basado en la partición del balance energético hacia el componente latente cuando el sistema dispone de humedad suficiente.

Tabla 9. Síntesis de hallazgos integrados.

Dimensión	Evidencia empírica promedio	Patrones identificados
Térmica	ΔT superficial $\approx 5\text{--}9$ °C; ΔT aire ≈ -2.5 °C	Alta sensibilidad a humedad del sustrato, orientación y clima
Energética	Ahorro HVAC $\approx 18\text{--}30\%$	Mayor efecto cuando se estabiliza humedad y se reduce pico radiativo
Climática	Mayor rendimiento en climas mediterráneos/templados	Disminución en climas áridos por limitación del componente latente
Calidad	Q1–Q2 $\approx 82\%$ del total	Mayor consistencia con validación in situ o enfoques híbridos

3.7. Limitaciones recurrentes y brechas derivadas del cuerpo de evidencia

En el conjunto de estudios incluidos se identificaron cinco limitaciones

recurrentes con implicación directa para la comparabilidad: (1) falta de estandarización de métricas térmicas (ΔT , MRT, PET, UTCI) y condiciones de reporte; (2) duración limitada de mediciones (predominio



de periodos < 6 meses), con riesgo de sesgo estacional; (3) validación cruzada insuficiente entre simulación y datos in situ en una proporción relevante; (4) ausencia de integración multiescala (edificio–barrio–ciudad), lo que restringe inferencias sobre mitigación de ICU a escala urbana; y (5) limitada incorporación de dimensiones socioeconómicas y operativas (costos, mantenimiento, disponibilidad hídrica), que condicionan transferencia a política pública y adopción masiva.

3.8. Síntesis final de resultados

Los resultados indicaron que los SIV, particularmente cubiertas y fachadas vegetadas, se asocian con mejoras térmicas y energéticas cuantificables en el periodo 2015–2025. Su eficacia se explicó por un equilibrio operativo entre vegetación–agua–radiación–morfología urbana, donde la disponibilidad hídrica y el régimen radiativo determinan la fracción latente del balance energético y, por ende, la magnitud del enfriamiento. En paralelo, la evidencia mostró una evolución hacia soluciones de envolvente híbrida (combinación de estrategias verdes con otras

medidas pasivas) y un uso creciente de modelación avanzada para predecir desempeño bajo escenarios de clima extremo, aunque persisten brechas metodológicas que limitan la comparación global y la extrapolación urbana.

4. Discusión

4.1. Interpretación general de los hallazgos

La síntesis del corpus revisado permite sostener, con alta convergencia empírica, que los Sistemas de Infraestructura Verde (SIV)—en particular cubiertas verdes, fachadas verdes, muros vivos y configuraciones azul–verdes—funcionan como dispositivos biofísicos de mitigación térmica capaces de reconfigurar el balance energético urbano y el desempeño termoenergético de la envolvente edificatoria, con impactos que se expresan tanto en variables de superficie (ΔT superficial), como en variables microclimáticas (T_a , MRT) y en indicadores integrados de confort (PET, UTCI, PMV), además de efectos relevantes en demanda energética de refrigeración y, en escenarios específicos, en



desempeño eléctrico de sistemas fotovoltaicos integrados (Abedrabboh et al., 2025; Tseliou et al., 2023; Jia et al., 2024; Feng et al., 2025; Alonso-Marroquin & Qadir, 2023).

En el plano cuantitativo, los resultados se organizan en dos regularidades robustas. Primero, la mitigación térmica es consistente pero heterogénea: en cubiertas verdes se observan descensos medibles de temperatura y amortiguación de picos térmicos bajo episodios de calor, con efectos intensificados cuando la disponibilidad hídrica del sustrato y la actividad transpiratoria de la vegetación sostienen el flujo de calor latente (λE) de forma estable; en muros vivos y fachadas verdes, el beneficio aparece modulado por orientación, porosidad/LAI, profundidad del sistema y régimen de riego, con impactos que pueden trasladarse al interior y al nivel peatonal, aunque con mayor sensibilidad a la ventilación y a la morfología del cañón urbano (Seo et al., 2025; Almaaitah, Drake, & Joksimovic, 2022; Bakhtyari et al., 2024; Li et al., 2022; Lin & Zhang, 2024). Segundo, el efecto no es

lineal respecto del “tipo” extensivo/intensivo o del espesor de sustrato: la evidencia converge en que el rendimiento térmico depende de un equilibrio funcional entre (i) agua disponible, (ii) arquitectura foliar y cobertura efectiva (LAI/porosidad), y (iii) exposición solar y condiciones de ventilación local, lo que desplaza la interpretación desde una lógica “materialista” (capas/espesores) hacia una lógica “metabólica” (flujos acoplados de agua–energía) (Almaaitah & Joksimovic, 2022; Kaiser et al., 2019; Kaboré et al., 2020; Habibi & Kahe, 2024; Abdulrazzaq et al., 2025).

Desde una perspectiva termodinámica aplicada, los resultados son difíciles de explicar si los SIV se reducen a “sombra” o “aislamiento”. La señal dominante que emerge de mediciones, experimentos y simulaciones sugiere que el mecanismo central es la redistribución del balance energético superficial: disminución de la fracción de calor sensible (H) y aumento de la fracción de calor latente (λE) mediante evapotranspiración y evaporación del sistema vegetación–sustrato,



además del control radiativo por sombreado, cambio de emisividad efectiva y modificación del albedo en el conjunto cubierta/fachada (Seo et al., 2025; Guattari et al., 2020; Feng, Wang, Zhou, Li, & Yu, 2022; Jamei et al., 2023; Gao et al., 2024). Una analogía didáctica útil consiste en comparar la envolvente convencional con una superficie “inerte” que acumula y retransmite energía, mientras que la envolvente verde se comporta como un “intercambiador biofísico” regulado por variables fisiológicas (apertura estomática), hidráulicas (humedad del sustrato) y microclimáticas (déficit de presión de vapor, viento), de modo que su rendimiento depende de la continuidad de esos acoplamientos. Esta lectura se refuerza en la evidencia sobre estrés hídrico: cuando la vegetación entra en déficit, el enfriamiento puede reducirse de forma sustantiva e incluso volverse marginal, lo que vuelve a la gobernanza hídrica una condición de reproducibilidad del efecto (Gräf et al., 2021; Abdulrazzaq et al., 2025; Gao et al., 2024; Alaa et al., 2025; Lambarki et al., 2024).

En climas cálidos áridos y semiáridos, la revisión muestra un patrón particularmente relevante: la mitigación térmica por SIV no desaparece, pero se vuelve altamente condicionada por riego mínimo, selección de especies, estrategias híbridas (p. ej., superficies frías, agua, sombra, vegetación) y criterios de decisión multicriterio que incluyen desempeño, consumo hídrico y factibilidad de mantenimiento (Abedrabboh et al., 2025; Mohammed, Khan, & Santamouris, 2023; Gao et al., 2024; Alaa et al., 2025; Ramadhan & Mahmoud, 2023). En este entorno, el valor del SIV se expresa no solo en ΔT superficial, sino en indicadores de confort y en la reducción de cargas térmicas del edificio, especialmente cuando el sistema se integra dentro de estrategias urbanas que consideran morfología, materiales y ventilación (Sayad et al., 2024; Khan et al., 2023; Mohajer et al., 2022; Dong & Asawa, 2025; Karimi et al., 2025). De forma complementaria, en climas húmedos o tropicales, el rendimiento puede ser alto cuando la evapotranspiración es sostenible, pero el diseño debe considerar el

comportamiento del sistema en régimen real (estacionalidad, lluvias, mantenimiento y crecimiento vegetal), así como la interacción con la humedad ambiental y la ventilación, para evitar lecturas simplistas centradas solo en temperatura del aire (Huang & Chen, 2020; Mohammad Shuhaimi et al., 2022; Pragati et al., 2023; Kachenchart & Panprayun, 2024; Lin et al., 2024).

Un matiz crítico es la distribución espacial del efecto. A escala urbana, la evidencia sugiere que el impacto agregado sobre la isla de calor urbana depende de porcentaje de cobertura efectiva, distribución espacial, continuidad de la red de infraestructura azul-verde y disponibilidad hídrica, además de los patrones de uso del suelo y de exposición de superficies (Spyrou et al., 2024; Zhu & Ooka, 2024; Luo et al., 2024; Yilmaz et al., 2025; Anderson et al., 2022). En cañones urbanos densos o a nivel peatonal, la vegetación de calle y soluciones de espacio público pueden superar a las cubiertas en confort térmico (MRT/PET/UTCI), mientras que las cubiertas maximizan su contribución en la reducción de carga térmica del

edificio y en la disminución del aporte de calor hacia la atmósfera urbana (Detommaso et al., 2021; Balany et al., 2022; Zheng et al., 2023; Ren et al., 2025; Hammoudeh & Sozer, 2025). Este hallazgo refuerza que el “lugar” del SIV importa: cubierta (radiación directa del techo), fachada (carga lateral y MRT), calle (confort peatonal), y soluciones mixtas como redes azul-verdes o corredores climáticos.

4.2. Comparación con revisiones y metaanálisis previos

En términos generales, los rangos reportados en el corpus se alinean con la literatura contemporánea que describe la infraestructura verde como una estrategia viable para mitigación del calor urbano y mejora del confort, particularmente cuando se integra a diagnósticos urbano-energéticos y a estrategias multi-escala de adaptación climática (Battisti, 2020; Afshari, 2023; Arriazu-Ramos et al., 2024; Karimi et al., 2025; Hammoudeh & Sozer, 2025). No obstante, la contribución diferenciadora del conjunto revisado se observa en tres direcciones: (i) el desempeño en climas áridos y semiáridos bajo restricciones hídricas y criterios de sostenibilidad



ecológica y económica; (ii) la consolidación de configuraciones multicapa (envolvente verde: cubierta + fachada + calle) como estrategia de resiliencia térmica; y (iii) la integración creciente con tecnologías activas y herramientas de simulación/optimización, incluidas co-simulaciones, gemelos digitales y modelos urbanos acoplados (Abdulrazzaq et al., 2025; Khan et al., 2023; Nesci et al., 2024; Tang et al., 2023; Almodóvar-Melendo & la Roche, 2025).

Respecto del primer punto, los hallazgos concuerdan en que en entornos áridos el agua se convierte en variable de primer orden: sin disponibilidad hídrica suficiente, la evapotranspiración se limita y el enfriamiento se reduce; con riego mínimo bien gestionado o infraestructuras azul-verdes, reaparecen reducciones medibles en temperatura y mejoras en confort y carga térmica, aunque con trade-offs que deben evaluarse con criterios de ciclo de vida y factibilidad (Gao et al., 2024; Abedrabbah et al., 2025; Lotfi & Hassan, 2024; Ramadhan & Mahmoud, 2023; Abdulrazzaq et al., 2025). Esta convergencia se refuerza cuando la literatura

incorpora sostenibilidad económica/ecológica y métricas de desempeño integradas para la toma de decisiones, particularmente en ciudades con presión hídrica (Abdulrazzaq et al., 2025; Johnson et al., 2021; Alaa et al., 2025; Lambarki et al., 2024; Jung et al., 2025).

En cuanto al segundo punto, el corpus reciente fortalece la lectura multicapa: cubiertas verdes, fachadas/muros vivos, vegetación a nivel de calle y soluciones azul-verdes pueden operar de manera complementaria, mitigando simultáneamente radiación directa, cargas laterales, MRT y acumulación térmica urbana, con beneficios más robustos que estrategias aisladas. Este patrón se observa tanto en estudios de confort a nivel peatonal como en simulaciones de desempeño energético, y se amplifica cuando se incluyen techos azul-verdes o soluciones de gestión de agua pluvial que sostienen el régimen hídrico del sistema (Cristiano et al., 2022; Almaaitah, Drake, & Joksimovic, 2022; Balany et al., 2022; Tseliou et al., 2023; Yilmaz et al., 2025). Además, la evidencia indica que la orientación es un determinante recurrente para

fachadas verdes: muros oeste y sur (según hemisferio y trayectoria solar) tienden a concentrar radiación lateral crítica en tardes cálidas, por lo que el diseño orientado y la elección de cobertura/porosidad pueden maximizar el ahorro energético y el confort (Li et al., 2024; Lin & Zhang, 2024; Pichlhöfer et al., 2023; Bagheri Moghaddam et al., 2021; Nocera et al., 2024).

En relación con el tercer punto, la integración SIV–fotovoltaica aparece como un cambio de paradigma: la vegetación puede contribuir a reducir temperatura de operación de los módulos, con ganancias en rendimiento eléctrico cuando el diseño evita sombreados indeseados y garantiza ventilación bajo paneles; además, sistemas híbridos con intercambiadores o configuraciones de techo combinadas sugieren que el SIV puede actuar como componente dentro de arquitecturas energéticas más complejas (Feng et al., 2025; Alonso-Marroquin & Qadir, 2023; Möslinger et al., 2025; Almodóvar-Melendo & la Roche, 2025; Toyo Diaz & Sajjadian, 2023). En paralelo, el corpus muestra expansión de herramientas de modelado y

optimización: desde modelos urbanos forzados por reanálisis climáticos hasta gemelos digitales y co-simulaciones que buscan representar acoplamientos termodinámicos y operativos más realistas (Afshari, 2023; Tang et al., 2023; Ledesma et al., 2022; Nesci et al., 2024; RAHIMI et al., 2025).

4.3. Implicaciones teóricas y prácticas

4.3.1. Implicaciones teóricas

En el plano teórico, el conjunto de resultados respalda la conceptualización de los SIV como intervenciones “de campo” que modifican simultáneamente radiación, humedad y aerodinámica urbana, más que como meros revestimientos. En particular, los estudios que analizan la interacción con la ventilación advierten trade-offs: ciertas configuraciones de muros verdes pueden reducir MRT y temperatura local, pero también aumentar resistencia aerodinámica y reducir ventilación en cañones urbanos si no se considera porosidad y geometría urbana. En consecuencia, una teoría robusta del desempeño debe integrar explícitamente el acoplamiento



radiación–evapotranspiración–aerodinámica, evitando inferencias basadas solo en ΔT superficial (Li et al., 2022; Mohammadi et al., 2023; Lin & Zhang, 2024; Sayad et al., 2024; Ren et al., 2025).

Asimismo, la evidencia comparativa sugiere “heterogeneidad del objeto” como variable teórica crítica: el beneficio marginal del SIV depende del punto de partida energético del edificio (nivel de aislamiento, masa térmica, operación HVAC), del tipo de uso (residencial, educativo, social), y de la forma de ocupación/operación, lo que obliga a articular la teoría microclimática con la teoría de desempeño energético y de rehabilitación del parque edificatorio (Arriazu-Ramos et al., 2024; Jia et al., 2024; Stamenković & Vučković, 2023; Du & Hagishima, 2025; Goda et al., 2023). Bajo ciertos perfiles, alternativas como cubiertas frías pueden competir o complementar a los SIV, sobre todo en escenarios futuros donde la eficiencia de base se incrementa y los beneficios marginales se vuelven sensibles a supuestos y calibración (Elnabawi et al., 2023; Jia et al., 2024; Scolaro et al., 2024; Tan et al., 2023; Zhu & Ooka, 2024). La teoría,

por tanto, debe incorporar comparabilidad tecnológica y condiciones de borde futuras (olas de calor, cambios de uso, escenarios climáticos), en lugar de tratar al SIV como solución universal.

Por otro lado, la incorporación de enfoques de justicia ambiental y “equidad térmica” refuerza una implicación teórica adicional: no basta con estimar un promedio urbano; importa quién se beneficia, dónde y en qué horarios. La evidencia que integra escalas y preferencias ciudadanas sugiere que la localización óptima de cubiertas verdes o soluciones azul-verdes debe considerar exposición social, vulnerabilidad y criterios distributivos, ampliando el marco desde “eficiencia térmica” hacia “eficiencia + equidad” (Anderson et al., 2022; Glytsos et al., 2025; Jung et al., 2025; Johnson et al., 2021; Hammoudeh & Sozer, 2025).

4.3.2. Implicaciones prácticas

Desde el punto de vista aplicado, los hallazgos favorecen la implementación de SIV como estrategia potencialmente costo-efectiva en densidades urbanas



altas, siempre que su diseño se base en evidencia local, se considere la gobernanza del agua y se incorpore el mantenimiento como parte del “sistema” (no como externalidad). En climas cálidos con alta radiación, la evidencia apoya la reducción de cargas de refrigeración y la mejora del confort interior/exterior cuando el SIV se integra con criterios de orientación, selección vegetal y control hídrico, y cuando se evalúa su compatibilidad con otras medidas (sombras, superficies frías, redes azul-verdes) (Habibi & Kahe, 2024; Kaboré et al., 2020; Tseliou et al., 2023; Hammoudeh & Sozer, 2025; Xiao et al., 2024). Para edificios con cubierta limitada o alta verticalidad, las fachadas verdes pueden aumentar área vegetada sin ampliar huella, pero su rendimiento depende de parámetros operativos: densidad vegetal, diseño de soporte, exposición solar, y disponibilidad hídrica, además de evitar mediciones o evaluaciones que subestimen el rol de MRT y del viento (Nocera et al., 2024; Ogut et al., 2024; Bakhtyari et al., 2024; Poiss et al., 2025; Stollberg & von Birgelen, 2023).

En términos de planificación urbana, los resultados sugieren que el máximo impacto se obtiene cuando la infraestructura verde se entiende como red conectada y distribuida, no como intervenciones aisladas. La evaluación de escenarios urbanos y de ubicación estratégica indica que la selección de superficies (qué cubiertas, qué barrios, qué corredores) puede optimizar beneficios con restricciones presupuestarias y preferencias ciudadanas, y que esta lógica es especialmente relevante para campus, distritos residenciales o tejidos industriales densos (Jung et al., 2025; Kim et al., 2021; Luo et al., 2024; Ciacci et al., 2022; Jeyachandran & Lee, 2024). En paralelo, la integración con gestión de agua pluvial y techos azul-verdes fortalece la resiliencia térmica y permite sostener el régimen hídrico sin depender de riego intensivo, siempre que el diseño hidrológico sea coherente con el microclima y con la operación real del edificio (Cristiano et al., 2022; Almaaitah, Drake, & Joksimovic, 2022; Johnson et al., 2021; Balany et al., 2022; Yilmaz et al., 2025).



Un aspecto práctico subrepresentado pero decisivo es la durabilidad y el desempeño a largo plazo. Aunque el corpus incluye estudios de monitoreo anual y de campo que fortalecen la validez ecológica, persiste la necesidad de evidencia longitudinal que capture degradación del sustrato, cambios de cobertura vegetal, alteración del régimen hídrico y variaciones estacionales completas. En términos operativos, el mantenimiento puede “habilitar” o “invertir” el efecto: el estrés hídrico y la mala gestión de la vegetación pueden elevar temperaturas foliares y reducir la función de enfriamiento, con implicaciones directas para políticas de implementación y costos de ciclo de vida (Ogut et al., 2024; Gräf et al., 2021; Abdulrazzaq et al., 2025; Lambarki et al., 2024; Sommese & Diana, 2025).

4.4. Crítica metodológica

A pesar de la amplitud del corpus, se identifican limitaciones metodológicas que afectan comparabilidad, generalización y capacidad inferencial. Primero, la heterogeneidad de métricas y escalas es persistente. Parte de la

literatura prioriza ΔT superficial; otra evalúa T_a a 2 m; otra se centra en MRT; y otra integra PET/UTCI/PMV, pero con reportes incompletos de variables de contexto (viento, humedad, radiación) y sin protocolos armonizados. En consecuencia, estudios con resultados similares de ΔT pueden implicar impactos distintos en confort, lo que limita síntesis cuantitativas homogéneas y afecta transferibilidad a diseño (Tseliou et al., 2023; Lin et al., 2024; Detommaso et al., 2021; Hollands et al., 2022; Dietrich, 2018).

Segundo, la duración de mediciones es un punto crítico. Un número apreciable de investigaciones se apoya en campañas cortas, lo que reduce observación estacional, adaptación de biomasa foliar, cambios en albedo/porosidad y respuesta al estrés hídrico. Aunque aumentan los estudios de monitoreo anual o multianual, su proporción todavía es insuficiente para sostener conclusiones fuertes sobre estabilidad funcional y durabilidad del beneficio, especialmente en contextos de olas de calor y variabilidad climática (Ogut et al., 2024; Möslinger et al., 2025; Spyrou



et al., 2024; Juras, 2022; Jamei et al., 2023).

Tercero, la dependencia de simulación sin validación empírica persiste como limitación estructural. Herramientas y enfoques como modelos urbanos simplificados, simulación energética, CFD y escenarios multi-escala se han expandido, pero los resultados pueden desviarse de forma relevante si no se calibran con datos in situ y si la vegetación/sustrato se parametriza con supuestos genéricos. Esto es especialmente sensible cuando el beneficio marginal es pequeño o cuando se comparan tecnologías competidoras (p. ej., cool roofs vs. green roofs) bajo escenarios futuros, donde la incertidumbre paramétrica puede cambiar decisiones de inversión y políticas (Afshari, 2023; Jia et al., 2024; Zhu & Ooka, 2024; RAHIMI et al., 2025; Toyo Diaz & Sajjadian, 2023). Adicionalmente, la medición de variables vegetales introduce desafíos experimentales: ciertos protocolos de temperatura foliar o de medición en muros vivos pueden sesgar resultados si no se controlan condiciones radiativas y de contacto, lo que exige estandarización y

transparencia metodológica (Stollberg & von Birgelen, 2023; Gräf et al., 2021; Pichlhöfer et al., 2023; Nocera et al., 2024; Poiss et al., 2025).

Cuarto, se observa sesgo geográfico y tecnológico. Aunque el corpus es global, existe concentración en ciertos contextos urbanos y climas, con presencia relativamente menor de estudios en América Latina, África u otras regiones con morfologías urbanas distintas y desafíos particulares de gobernanza hídrica y mantenimiento. Esta limitación afecta extrapolación a climas tropicales con alta radiación y humedad, así como a tejidos urbanos informales o altamente densificados, donde la interacción con ventilación y espacio público es decisiva (Huang & Chen, 2020; Ledesma et al., 2022; Scolaro et al., 2024; Zheng et al., 2023; Sayad et al., 2024). Aunque aparecen contribuciones en contextos específicos—incluidas evaluaciones en regiones cálidas y húmedas o casos de infraestructura urbana—la evidencia aún demanda expansión regional y bancos de datos comparables.



Tabla 10. Limitaciones metodológicas principales y estrategias de mejora (síntesis del corpus).

Tipo de limitación	Impacto probable en resultados	Estrategias de mitigación recomendadas
Variabilidad métrica (ΔT , T_a , MRT, PET, PMV, UTCI)	Reduce comparabilidad e impide síntesis homogéneas	Protocolos mínimos de reporte; armonización hacia indicadores integrados de confort; reporte completo de viento/humedad/radiación (Tseliou et al., 2023; Lin et al., 2024)
Duración corta de observación	Subestima estacionalidad, estrés hídrico y degradación funcional	Monitoreos ≥ 12 meses; reporte de mantenimiento/irrigación; evaluación bajo olas de calor (Ogut et al., 2024; Spyrou et al., 2024)
Simulación sin validación empírica	Riesgo de sesgo paramétrico y errores de calibración	Calibración local con mediciones in situ; análisis de sensibilidad; comparación con soluciones alternativas (Afshari, 2023; Jia et al., 2024)
Sesgo geográfico/tecnológico	Limitación de generalización a climas/regiones subrepresentadas	Expansión regional; repositorios de datos; protocolos comparables; inclusión de equidad térmica (Glytsos et al., 2025; Anderson et al., 2022)

4.5. Líneas futuras de investigación

La agenda futura se estructura en cinco ejes. Primero, la optimización y calibración mediante modelos computacionalmente eficientes, aprendizaje automático y enfoques de decisión multicriterio que integren desempeño térmico, consumo hídrico, costos y equidad, especialmente en escenarios de cambio climático y restricción de recursos (Afshari, 2023; Alaa et al., 2025; Jung et al., 2025; Glytsos et al., 2025; Khan et al., 2023). En esta línea, los marcos “smart” para diseño óptimo de cubiertas verdes y su integración con modelos urbanos acoplados son especialmente prometedores, siempre que se

sostengan con validación empírica (Mousavi et al., 2023; RAHIMI et al., 2025; Dong & Asawa, 2025; Hammoudeh & Sozer, 2025; Karimi et al., 2025).

Segundo, la simulación multiescalar que conecte edificio–barrio–ciudad, articulando microclima, demanda energética y distribución espacial del beneficio, con atención explícita a la dinámica temporal durante olas de calor y a la interacción con morfología urbana y materiales. Los estudios de distribución espacio-temporal y escenarios de alto calor son una base importante, pero requieren mayor convergencia metodológica y trazabilidad de supuestos (Zhu & Ooka, 2024; Tan



et al., 2023; Spyrou et al., 2024; Luo et al., 2024; Mohajer et al., 2022).

Tercero, estudios longitudinales de durabilidad y resiliencia ecológica del sistema, incorporando degradación del sustrato, cambios de biomasa, estrés hídrico real, mantenimiento y desempeño térmico a largo plazo. Este eje es crítico para convertir evidencia de corto plazo en políticas de implementación sostenibles y para valorar beneficios de protección de la cubierta/membranas y estabilidad térmica anual (Sommese & Diana, 2025; Ogut et al., 2024; Möslinger et al., 2025; Juras, 2022; Abdulrazzaq et al., 2025).

Cuarto, evaluación integrada de ciclo de vida y huella hídrica/energética, incluyendo el costo ecológico del riego en climas áridos y la comparación con soluciones alternativas (cool roofs, pavimentos porosos, superficies de alta reflectancia). La evidencia comparativa debe ampliarse hacia modelos de costo–beneficio y escenarios futuros, incorporando también valoraciones económicas del manejo de aguas pluviales y su relación con mitigación térmica (Johnson et al., 2021; Elnabawi et

al., 2023; Jia et al., 2024; Bustami et al., 2022; Scolaro et al., 2024).

Quinto, transferencia tecnológica a contextos subrepresentados y construcción de evidencia local con especies adaptadas, diseños replicables y protocolos de medición armonizados. El desarrollo de casos en campus, vivienda social y tejidos urbanos densos puede acelerar la apropiación técnica, siempre que se acompañe de gobernanza de mantenimiento y de criterios de equidad térmica (Goda et al., 2023; Ledesma et al., 2022; Jeyachandran & Lee, 2024; Anderson et al., 2022; Glytsos et al., 2025). Complementariamente, la integración con tecnologías activas y soluciones híbridas abre un campo de alta relevancia: PV + cubiertas verdes, cubiertas verdes + intercambiadores, y redes azul–verdes con control de agua para sostener λE bajo calor extremo (Feng et al., 2025; Alonso-Marroquin & Qadir, 2023; Möslinger et al., 2025; Almodóvar-Melendo & la Roche, 2025; Cristiano et al., 2022).

4.6. Cierre de la discusión

En conjunto, la revisión confirma que los SIV constituyen estrategias



biofísicas integrales para enfrentar el calentamiento urbano, con eficacia basada en la reconfiguración del balance energético local mediante intercambios acoplados de masa y energía, más que en una explicación reducida a sombra o aislamiento. La evidencia también establece límites: el desempeño depende de la disponibilidad hídrica, del contexto climático, de la morfología urbana, de la ventilación, del punto de partida energético del edificio y de la operación real del sistema; en consecuencia, la implementación exige diseño basado en evidencia y calibración local, incorporando mantenimiento y equidad térmica como componentes del sistema y no como supuestos externos (Abedrabboh et al., 2025; Gao et al., 2024; Li et al., 2022; Jia et al., 2024; Glytsos et al., 2025).

En términos conceptuales, se consolida una transición desde la “edificación pasiva” hacia una “edificación eco-integrada”, donde vegetación, agua, materiales y tecnologías activas pueden operar como componentes interdependientes de un mismo sistema climático urbano, siempre que el diseño controle trade-offs

(ventilación vs. sombreado), optimice localización y garantice sustentabilidad hídrica y económica (Feng et al., 2025; Alonso-Marroquin & Qadir, 2023; Cristiano et al., 2022; Abdulrazzaq et al., 2025; Hammoudeh & Sozer, 2025). Bajo esta perspectiva, la infraestructura verde deja de ser un componente meramente paisajístico y se redefine como tecnología climática urbana, cuyo potencial pleno depende de integrar rendimiento térmico, eficiencia energética, hidrología urbana, justicia ambiental y planificación multiescalar en escenarios presentes y futuros (Anderson et al., 2022; Jung et al., 2025; Zhu & Ooka, 2024; Karimi et al., 2025; RAHIMI et al., 2025).

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten afirmar que los Sistemas de Infraestructura Verde (SIV) principalmente cubiertas y fachadas vegetadas constituyen una estrategia esencial para la mitigación del cambio climático urbano. Su capacidad de reducir la temperatura superficial entre 6 °C y 9 °C y de disminuir la demanda energética en



un 20–30 % convierte a estos sistemas en herramientas efectivas para la regulación térmica y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 11 y 13). A nivel ambiental, su implementación masiva podría reducir la intensidad promedio de las islas de calor urbanas hasta en 2,5 °C, contribuyendo significativamente a la resiliencia climática y la sostenibilidad de las ciudades.

Desde el ámbito arquitectónico y constructivo, los SIV se consolidan como soluciones híbridas que integran principios bioclimáticos, ingeniería de materiales y eficiencia energética. La evidencia demuestra que los sistemas combinados (cubiertas + fachadas verdes) ofrecen un comportamiento térmico superior, prolongan la vida útil de los materiales impermeabilizantes hasta en un 40 % y mejoran la habitabilidad interior al estabilizar la temperatura y la humedad relativa. Estos resultados sugieren que la infraestructura verde debe incorporarse como componente estructural de los edificios sostenibles y no solo como elemento estético o paisajístico.

A nivel operativo y metodológico, la eficacia de los SIV depende fundamentalmente de la gestión hídrica, la selección de especies vegetales y el mantenimiento continuo. La revisión evidencia la necesidad de homogeneizar los indicadores térmicos utilizados (ΔT , PET, UTCI) y de ampliar la duración de las mediciones experimentales para evaluar la resiliencia a largo plazo. Se recomienda el desarrollo de modelos multiescales (micro–meso–macro) y el uso de inteligencia artificial para la predicción térmica adaptativa. El futuro del diseño sostenible se orienta hacia una ecoeficiencia integrada, donde vegetación, energía y tecnología conforman un sistema biofísico autorregulante.

En suma, la infraestructura verde representa una transición conceptual desde la edificación pasiva hacia la edificación ecoactiva, en la cual la vegetación funciona como un dispositivo termodinámico que restablece el equilibrio energético entre el ambiente construido y el natural. La consolidación de políticas urbanas que fomenten su adopción no solo aportará beneficios térmicos y energéticos, sino que redefinirá la



relación entre arquitectura,
sostenibilidad y bienestar humano.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuid.2023.112991>

Bibliografía

Abdulrazzaq, Z. M., Al-Zurfi, M. T., & Alrawi, A. K. (2025). Assessing Ecological and Economic Sustainability of Green Roof Systems in Semi-Arid Urban Landscapes. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 13(3), 233–252.
https://doi.org/10.14246/irsp sd.13.3_233

Abedrabbah, O., Fountoukis, C., Al-Ansari, T., & Alfarra, M. R. (2025). Simulating microclimate adaptation: Evaluating heat mitigation strategies for Doha, Qatar, under current and future climate conditions. *Sustainable Cities and Society*, 132.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106777>

Afshari, A. (2023). Optimization of urban design/retrofit scenarios using a computationally light standalone urban energy/climate model (SUECM) forced by ERA5 data. *Energy and Buildings*, 287.

Alaa, R., Elbalazi, A., & Ismaeel, W. S. E. (2025). Optimal Roof Strategy for Mitigating Urban Heat Island in Hot Arid Climates: Simulation and Python-Based Multi-Criteria Decision Analysis. *Urban Science*, 9(8).
<https://doi.org/10.3390/urban sci9080310>

Almaaitah, T., Drake, J., & Joksimovic, D. (2022). Impact of design variables on hydrologic and thermal performance of green, blue-green and blue roofs. *Blue-Green Systems*, 4(2), 135–155.
<https://doi.org/10.2166/bgs.2022.016>

Almaaitah, T., & Joksimovic, D. (2022). Hydrologic and Thermal Performance of a Full-Scale Farmed Blue-Green Roof. *Water (Switzerland)*, 14(11).
<https://doi.org/10.3390/w14111700>

Almodóvar-Melendo, J. M., & la Roche, P. (2025). Thermal Evaluation of a Water-to-Air Heat Exchanger Combined with Different Roof Configurations for Passive Cooling. *Buildings*, 15(7).
<https://doi.org/10.3390/buildings15071098>



- Almutairi, K., Esfahani, E. M., Mostafaeipour, A., Issakhov, A., Kaewpraek, C., & Techato, K. (2021). A novel policy to optimize energy consumption for dairy product warehouses: A case study. *Sustainability (Switzerland)*, 13(5), 1–26. <https://doi.org/10.3390/su13052445>
- Alonso-Marroquin, F., & Qadir, G. (2023). Synergy between Photovoltaic Panels and Green Roofs. *Energies*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/en16135184>
- Anand, J., & Sailor, D. J. (2023). How can we combine urban cooling strategies to effectively cool cities over the entire diurnal cycle?
- Anderson, V., Gough, W. A., Zgela, M., Milosevic, D., & Dunjic, J. (2022). Lowering the Temperature to Increase Heat Equity: A Multi-Scale Evaluation of Nature-Based Solutions in Toronto, Ontario, Canada. *Atmosphere*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/atmos13071027>
- Arriazu-Ramos, A., Pons Izquierdo, J. J., Ramos Ruiz, G., Sánchez-Ostiz, A., & Monge-Barrio, A. (2024). Facing Climate Change in a Temperate European City: Urban-Scale Diagnosis of Indoor Overheating and Adaptation Strategies for Residential Buildings. *Buildings*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/buildings14051423>
- Ascione, F., Bianco, N., de Masi, R. F., Mastellone, M., & Peter Vanoli, G. (2019). Phase change materials for reducing cooling energy demand and improving indoor comfort: A step-by-step retrofit of a Mediterranean educational building. *Energies*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/en12193661>
- Ascione, F., Iovane, T., Manniti, G., & Mastellone, M. (2025). Urban and building scale strategies to cool cities: the case of a coastal city in the Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115998>
- Azkorra-Larrinaga, Z., Romero-Antón, N., Martín-Escudero, K., & Lopez-Ruiz, G. (2023). Environmentally Sustainable Green Roof Design for Energy Demand Reduction. *Buildings*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/buildings13071846>
- Bagheri Moghaddam, F., Fort Mir, J. M., Navarro Delgado, I., & Redondo Dominguez, E. (2021). Evaluation of thermal comfort performance of a



- vertical garden on a glazed façade and its effect on building and urban scale, case study: An office building in barcelona. Sustainability (Switzerland), 13(12). <https://doi.org/10.3390/su13126706>
- Bakhtyari, V., Fattahi, K., Movahed, K., & Franz, A. (2024). Investigating the Effect of Living Walls on Cooling Energy Consumption in Various Urban Microclimates, Building Heights, and Greenery Coverage Areas. Sustainability (Switzerland), 16(2). <https://doi.org/10.3390/su16020920>
- Balany, F., Muttill, N., Muthukumaran, S., Wong, M. S., & Ng, A. W. M. (2022). Studying the Effect of Blue-Green Infrastructure on Microclimate and Human Thermal Comfort in Melbourne's Central Business District. Sustainability (Switzerland), 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159057>
- Battisti, A. (2020). Bioclimatic architecture and urban morphology. Studies on intermediate urban open spaces. Energies, 13(21). <https://doi.org/10.3390/en13215819>
- Blanco, I., Schettini, E., Mugnozza, G. S., & Vox, G. (2018). Thermal behaviour of green façades in summer. Journal of Agricultural Engineering, 49(3), 183–190. <https://doi.org/10.4081/jae.2018.835>
- Bochenek, A. D., & Klemm, K. (2020). The impact of passive green technologies on the microclimate of historic urban structures: The case study of lodz. Atmosphere, 11(9). <https://doi.org/10.3390/atmos11090974>
- Boujelbene, M., Boukholda, I., Guesmi, T., Amara, M. ben, & Khalilpoor, N. (2023). Solar reflection and effect of roof surfaces material characteristics in heat island mitigation: toward green building and urban sustainability in Ha'il, Saudi Arabia. International Journal of Low-Carbon Technologies, 18, 1039–1047. <https://doi.org/10.1093/ijlct/c tad090>
- Brahimi, M., Benabbas, M., Altan, H., Nocera, F., & Costanzo, V. (2023). Enhancing Urban Microclimates: Potential Benefits of Greenery Strategies in a Semi-Arid Environment. Sustainability (Switzerland), 15(23).



- <https://doi.org/10.3390/su152316380>
- Bustami, R. A., Beecham, S., & Hopeward, J. (2022). Evaporative Cooling Effect of Water-Sensitive Urban Design: Comparing a Living Wall with a Porous Concrete Pavement System. *Water (Switzerland)*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/w14223759>
- Bustami, R. A., Beecham, S., Hopeward, J., Belusko, M., & Khairulzaim, A. A. M. (2025). The Effect of Climate on Thermal Loads in Living Walls. *Environments - MDPI*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/environments12030078>
- Berardi, U. (2015). The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Energy and Buildings*, 121, 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.enbuid.2016.03.021>
- Cascone, S., & Vitaliano, S. (2025). Innovative green roof technologies in Mediterranean climate: Implications for sustainable design of the built environment. *Building and Environment*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.buidenv.2025.112715>
- Cascone, S. (2019). Green roof design: State of the art on technology and materials. *Sustainability*, 11(11), 3020. <https://doi.org/10.3390/su1113020SCHER>
- Chandra, M. S., Nandapala, K., Priyadarshana, G., & Halwatura, R. U. (2019). Developing a durable thermally insulated roof slab system using bamboo insulation panels. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 10(4), 511–522. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-0308-x>
- Chidambaram, C., Nath, S. S., Varshney, P., & Kumar, S. (2022). Assessment of terrace gardens as modifiers of building microclimate. *Energy and Built Environment*, 3(1), 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.11.003>
- Ciacchi, C., Banti, N., di Naso, V., Montechiaro, R., & Bazzocchi, F. (2022). Experimentation of Mitigation Strategies to Contrast the Urban Heat Island Effect: A Case Study of an Industrial District in Italy to Implement Environmental Codes. *Atmosphere*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/atmos13111808>



- Convertino, F., Vox, G., & Schettini, E. (2019). Heat transfer mechanisms in vertical green systems and energy balance equations. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 14(1), 7–18. <https://doi.org/10.2495/DNE-V14-N1-7-18>
- Cristiano, E., Annis, A., Apollonio, C., Pumo, D., Urru, S., Viola, F., Deidda, R., Pelorosso, R., Petroselli, A., Tauro, F., Grimaldi, S., Francipane, A., Alongi, F., Noto, L. V., Hoes, O., Klapwijk, F., Schmitt, B., & Nardi, F. (2022). Multilayer blue-green roofs as nature-based solutions for water and thermal insulation management. *Hydrology Research*, 53(9), 1129–1149. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.201>
- Detommaso, M., Gagliano, A., Marletta, L., & Nocera, F. (2021). Sustainable urban greening and cooling strategies for thermal comfort at pedestrian level. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/su13063138>
- Dietrich, U. (2018). Urban street canyons - Impact of different materials and colours of facades and ground and different positions of persons on outdoor thermal comfort. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 13(4), 582–593. <https://doi.org/10.2495/SDP-V13-N4-582-593>
- Djedjig, R., el Ganaoui, M., Belarbi, R., & Bennacer, R. (2017). Thermal effects of an innovative green wall on building energy performance. *Mechanics and Industry*, 18(1). <https://doi.org/10.1051/meca/2016015>
- Dong, F., & Asawa, T. (2025). A simulation study on building-scale strategies for urban heat island mitigation and building energy consumption: Case study in Japan. *Building and Environment*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112311>
- Du, P., & Hagishima, A. (2025). Retrofitting strategies for thermal comfort and sustainability in Ulaanbaatar's traditional housing. *Journal of Building Engineering*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2025.111803>
- Elnabawi, M. H., Hamza, N., & Raveendran, R. (2023). 'Super cool roofs': Mitigating the UHI effect and enhancing urban thermal comfort with



- high albedo-coated roofs. *Results in Engineering*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.rine.2023.101269>
- Evangelisti, L., de Cristo, E., & de Lieto Vollaro, R. (2025). In Situ Winter Performance and Annual Energy Assessment of an Ultra-Lightweight, Soil-Free Green Roof in Mediterranean Climate: Comparison with Traditional Roof Insulation. *Energies*, 18(17). <https://doi.org/10.3390/en18174581>
- Feng, X., Zeng, G., Ying, C., Zainudin, E. bin, Jusuf, S. K., Soh, C. B., & Choon Ann, K. L. (2025). Analysis of microclimate and electrical performance of solar green roofs through a Large-Scale experimental study in a tropical microgrid. *Energy and Buildings*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.enbuid.2025.115957>
- Feng, Y., Wang, J., Zhou, W., Li, X., & Yu, X. (2022). Evaluating the Cooling Performance of Green Roofs Under Extreme Heat Conditions. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.874614>
- Flores-Nicolás, A., Flores-Nicolás, M., Menchaca-Campos, E. C., & Uruchurtu-Chavarín, J. (2025). STUDY ON CORROSION OF REINFORCED CONCRETE WITH SYNTHETIC FIBER USING ELECTROCHEMICAL NOISE TECHNIQUE. *Civil and Environmental Engineering*, 28(1), 271–281. <https://doi.org/10.2478/cee-2025-0021>
- Gagliano, A., Nocera, F., Detommaso, M., & Evola, G. (2016). Thermal behavior of an extensive green roof: Numerical simulations and experimental investigations. *International Journal of Heat and Technology*, 34(Special Issue 2), S226–S234. <https://doi.org/10.18280/ijht.34S206>
- Gao, K., Haddad, S., Paolini, R., Feng, J., Altheeb, M., Mogirah, A. al, Moammar, A. bin, & Santamouris, M. (2024). The use of green infrastructure and irrigation in the mitigation of urban heat in a desert city. *Building Simulation*, 17(5), 679–694. <https://doi.org/10.1007/s1273-024-1110-0>
- Gholami, M., Barbaresi, A., Tassinari, P., Bovo, M., & Torreggiani, D. (2020). A comparison of energy and thermal performance of rooftop greenhouses and green roofs in Mediterranean climate: A hygrothermal assessment in WuFi.



- Energies, 13(8).
<https://doi.org/10.3390/en13082030>
- Glytsos, T., Mavrigiannaki, A., Kalogirou, E., Litos, B., Anastasiadou, P. S., & Kolokotsa, D. (2025). Introducing the environmental justice perspective in the evaluation of NbS implementation; Chania, Crete case study. *Energy and Buildings*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.enbuid.2025.115736>
- Goda, Z. M. A., Foda, M. A. M., & Elsayyad, N. A. E. (2023). Using Green Roofs for Social Housing to Improve Energy Consumption in New Cities. (An Applied Study of Social Housing in Egypt's New Cairo City). *Future Cities and Environment*, 9(1). <https://doi.org/10.5334/fce.165>
- Gräf, M., Immitzer, M., Hietz, P., & Stangl, R. (2021). Water-stressed plants do not cool: Leaf surface temperature of living wall plants under drought stress. *Sustainability (Switzerland)*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/su13073910>
- Guattari, C., Evangelisti, L., Asdrubali, F., & de Lieto Vollaro, R. L. (2020). Experimental evaluation and numerical simulation of the thermal performance of a green roof. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/app10051767>
- Guo, R., & Zhao, S. (2025). Application of Green Roof Landscape Design Incorporating Building Energy Efficiency Concepts and Analysis of Urban Thermal Efficiency Benefits. *International Energy Journal*, 25(3), 401–414. <https://doi.org/10.64289/iej.25.0309.4933650>
- Habibi, A., & Kahe, N. (2024). Evaluating the Role of Green Infrastructure in Microclimate and Building Energy Efficiency. *Buildings*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/buildings14030825>
- Hammoudeh, S. S., & Sozer, H. (2025). Evaluating District Indicators for Mitigating Urban Heat Island Effects and Enhancing Energy Savings. *Sustainability (Switzerland)*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/su17093997>
- Hao, X., Liu, L., Tan, H., Lin, Y., Hu, J., & Yin, W. (2022). The Impacts of Greenery Systems on Indoor Thermal Environments in Transition Seasons: An Experimental Investigation. *Buildings*,



- 12(5).
<https://doi.org/10.3390/buildings12050506>
- Hirano, Y., Ihara, T., Gomi, K., & Fujita, T. (2019). Simulation-based evaluation of the effect of Green Roofs in Office Building Districts on Mitigating the Urban Heat Island effect and reducing CO₂ emissions. *Sustainability (Switzerland)*, 11(7).
<https://doi.org/10.3390/SU11072055>
- Hollands, J., Sesto, E., & Korjenic, A. (2022). Thermal Comfort in a Greened Office Building: Investigation and Evaluation through Measurement and Survey. *Sustainability (Switzerland)*, 14(21).
<https://doi.org/10.3390/su142114450>
- Hoelscher, M.-T., Nehls, T., Jänicke, B., & Wessolek, G. (2016). Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 114, 283–290.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047>
- Huang, J. M., & Chen, L. C. (2020). A numerical study on mitigation strategies of urban heat islands in a tropical megacity: A case study in Kaohsiung city, Taiwan. *Sustainability (Switzerland)*, 12(10).
<https://doi.org/10.3390/SU12103952>
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge University Press.
- Jahangir, M. H., Zarfeshani, A., & Arast, M. (2024). Investigation of green roofs effects on reducing of the urban heat islands formation (The case of a municipal district of Tehran City, Iran). *Nature-Based Solutions*, 5.
<https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100100>
- Jamei, E., Thirunavukkarasu, G., Chau, H. W., Seyedmahmoudian, M., Stojcevski, A., & Mekhilef, S. (2023). Investigating the cooling effect of a green roof in Melbourne. *Building and Environment*, 246.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110965>
- Jareemit, D., & Canyookt, P. (2021). Residential cluster design and potential improvement for maximum energy performance and outdoor thermal comfort on a hot summer in Thailand. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(2), 592–603.
<https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa091>
- Jeyachandran, I., & Lee, J. (2024). *Case Study: Impact Analysis*



- of Roof-Top Green Infrastructure on Urban System Sustainability in San José, CA. Sustainability (Switzerland), 16(22). <https://doi.org/10.3390/su16229781>
- Jia, S., Weng, Q., Yoo, C., Xiao, H., & Zhong, Q. (2024). Building energy savings by green roofs and cool roofs in current and future climates. Npj Urban Sustainability, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00159-8>
- Johnson, D., Exl, J., & Geisendorf, S. (2021). The potential of stormwater management in addressing the urban heat island effect: An economic valuation. Sustainability (Switzerland), 13(16). <https://doi.org/10.3390/su13168685>
- Jung, M., Gomes, S. L., & Remme, R. P. (2025). Strategic green roof placement in Toronto to maximize benefits while incorporating citizen preferences. Urban Forestry and Urban Greening, 107. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128798>
- Juras, P. (2022). Positive Aspects of Green Roof Reducing Energy Consumption in Winter. Energies, 15(4). <https://doi.org/10.3390/en15041493>
- Kaboré, M., Bozonnet, E., & Salagnac, P. (2020). Building and urban cooling performance indexes of wetted and green roofs-a case study under current and future climates. Energies, 13(23). <https://doi.org/10.3390/en13236192>
- Kachenchart, B., & Panprayun, G. (2024). Selection of tropical plants for an extensive green roof with abilities of thermal performance, energy conservation, and greenhouse gas mitigation. Building and Environment, 265. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112029>
- Kaiser, D., Köhler, M., Schmidt, M., & Wolff, F. (2019). Increasing evapotranspiration on extensive green roofs by changing substrate depths, construction, and additional irrigation. Buildings, 9(7). <https://doi.org/10.3390/buildings9070173>
- Karimi, A., Moreno-Rangel, D., & García-Martínez, A. (2025). Granular mapping of UHI and heatwave effects: Implications for building performance and urban resilience. Building and Environment, 273. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112705>



- Khan, A., Carlosena, L., Khorat, S., Khatun, R., Das, D., Doan, Q. van, Hamdi, R., Aziz, S. M., Akbari, H., Santamouris, M., & Niyogi, D. (2023). Urban cooling potential and cost comparison of heat mitigation techniques for their impact on the lower atmosphere. *Computational Urban Science*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s43762-023-00101-1>
- Kim, H., Oh, K., & Lee, D. (2021). Establishment of a geographic information system-based algorithm to analyze suitable locations for green roofs and roadside trees. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/app11167368>
- Köhler, M., & Kaiser, D. (2019). Evidence of the climate mitigation effect of green roofs-A 20-year weather study on an Extensive Green Roof (EGR) in Northeast Germany. *Buildings*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/buildings9070157>
- Lambarki, R., Achbab, E., Maanan, M., & Rhinane, H. (2024). Evaluating the technical and economic aspects of thermal performance of extensive green roofs: A GIS-based case study in the urban setting of Na-dor, Morocco. *Chinese Journal of*
- Population, Resources and Environment*, 22, 410–422. <https://doi.org/10.1016/j.cjpre.2024.04.005>
- Lang-Eurisch, B., Bishara, N., & Hübler, C. (2025). Informed green façade selection: integrating LCA and microclimatic analysis for a dual-method approach. *Journal of Building Performance Simulation*. <https://doi.org/10.1080/19401493.2025.2538039>
- Ledesma, G., Nikolic, J., & Pons-Valladares, O. (2022). Co-simulation for thermodynamic coupling of crops in buildings. Case study of free-running schools in Quito, Ecuador. *Building and Environment*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108407>
- Li, H., Zhao, Y., Sützl, B., Kubilay, A., & Carmeliet, J. (2022). Impact of green walls on ventilation and heat removal from street canyons: Coupling of thermal and aerodynamic resistance. *Building and Environment*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108945>
- Li, L., Cheng, J., Liu, Z., Li, Q., Yu, L., Zhou, X., & Pang, Y. (2024). The Impact of Coverage Forms of Exterior Vertical Greening Walls on the Thermal Environmental



- Benefits of Buildings in Hot and Humid Regions. Buildings, 14(12). <https://doi.org/10.3390/buildings14123840>
- Li, D., & Bou-Zeid, E. (2015). Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves: The impact in cities is larger than the sum of its parts. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52(9), 2051–2064. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-02.1>
- Lin, C., Wu, Z., Li, H., Huang, J., & Huang, Q. (2024). Comprehensive analysis on the thermal comfort of various greening forms: a study in hot-humid areas. Environmental Research Communications, 6(2). <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad277e>
- Lin, C., & Zhang, S. (2024). Impact of Green Roofs and Walls on the Thermal Environment of Pedestrian Heights in Urban Villages. Buildings, 14(12). <https://doi.org/10.3390/buildings14124063>
- Liu, S., Levinson, R., & Narumi, D. (2023). Numerical Analysis of Various Heat Countermeasures: Effects on Energy Consumption and Indoor Thermal Comfort in Densely Built Wooden House Area. Atmosphere, 14(10). <https://doi.org/10.3390/atmos14101566>
- Lotfi, Y., & Hassan, M. A. (2024). Optimizing energy efficiency and thermal comfort of green envelope applications in hot arid climate. Discover Applied Sciences, 6(2). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05698-4>
- Luo, T., Liu, Y., Zhai, Y., & Gong, X. (2024). Is LCZ Enough? Physical Properties, Thermal Environments and Cooling Effects of Green Roofs in High-Density Urban Industrial Blocks. Land, 13(10). <https://doi.org/10.3390/land13101642>
- Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2021). Green roof systems: A review of their thermal performance in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40, 120–135. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>
- Majeed, N. N., & Alsultani, R. (2025). FAÇADE ANALYSIS FOR INDOOR COMFORT IN ARCHITECTURAL DESIGN. Civil and Environmental Engineering, 28(1), 254–270. <https://doi.org/10.2478/cee-2025-0020>



- Meier, L., Raps, J., & Leistner, P. (2020). Insect habitat systems integrated into facades-impact on building physics and awareness of society. *Sustainability* (Switzerland), 12(2). <https://doi.org/10.3390/su12020570>
- Mohajer, H. R. H., Ding, L., & Santamouris, M. (2022). Developing Heat Mitigation Strategies in the Urban Environment of Sydney, Australia. *Buildings*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/buildings12070903>
- Mohammad Shuhaimi, N. D. A., Mohamed Zaid, S., Esfandiari, M., Lou, E., & Mahyuddin, N. (2022). The impact of vertical greenery system on building thermal performance in tropical climates. *Journal of Building Engineering*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103429>
- Mohammadi, M., Tien, P. W., & Calautit, J. K. (2023). Numerical evaluation of the use of vegetation as a shelterbelt for enhancing the wind and thermal comfort in peripheral and lateral-type skygardens in highrise buildings. *Building Simulation*, 16(2), 243–261. <https://doi.org/10.1007/s12273-022-0943-7>
- Mohammed, A. B. (2022). Employing systems of green walls to improve performance and rationalize energy in buildings. *Journal of Engineering and Applied Science*, 69(1). <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00154-9>
- Mohammed, A., Khan, A., & Santamouris, M. (2023). Numerical evaluation of enhanced green infrastructures for mitigating urban heat in a desert urban setting. *Building Simulation*, 16(9), 1691–1712. <https://doi.org/10.1007/s12273-022-0940-x>
- Möslinger, L., Streit, E., Korjenic, A., & Sulejmanoski, A. (2025). Microclimatic Effects of Retrofitting a Green Roof Beneath an East–West PV Array: A Two-Year Field Study in Austria. *Sustainability* (Switzerland), 17(16). <https://doi.org/10.3390/su17167495>
- Mousavi, S. N., Gheibi, M., Waclawek, S., & Behzadian, K. (2023). A novel smart framework for optimal design of green roofs in buildings conforming with energy conservation and thermal comfort. *Energy and Buildings*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113111>



- Mutani, G., & Todeschi, V. (2021). Roof-integrated green technologies, energy saving and outdoor thermal comfort: Insights from a case study in urban environment. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 16(1), 13–23. <https://doi.org/10.18280/ijspd.p.160102>
- Nesci, V., Ballarini, I., Rando Mazzarino, P., & Corrado, V. (2024). Living Walls and Green Façades: An Implementation Code for Energy Simulation. *Buildings*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/buildings14072040>
- Nicol, E., & Terzano, K. (2025). Modelling the optimal green roof type for carbon capture in an urbanised university campus. *Urban Forestry and Urban Greening*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128946>
- Nocera, F., Costanzo, V., Detommaso, M., & Evola, G. (2024). Assessing the Impact of Vertical Greenery Systems on the Thermal Performance of Walls in Mediterranean Climates. *Energies*, 17(20). <https://doi.org/10.3390/en17205090>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). Urban climates. Cambridge University Press.
- Ogut, O., Tzortzi, J. N., Cavazzani, S., & Bertolin, C. (2024). Evaluating the Urban Heat Mitigation Potential of a Living Wall in Milan: One Year of Microclimate Monitoring. *Land*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/land13060794>
- Oquendo-Di Cosola, V., Olivieri, F., Ruiz-García, L., & Sánchez-Reséndiz, J. A. (2022). Thermal performance of green roofs in warm climates: Experimental and simulation approaches. *Building and Environment*, 207, 108456. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108456>
- Park, J., Shin, Y., Kim, S., Lee, S. W., & An, K. (2022). Efficient Plant Types and Coverage Rates for Optimal Green Roof to Reduce Urban Heat Island Effect. *Sustainability (Switzerland)*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/su14042146>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71.



- <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Perera, T. A. N. T., Jayasinghe, G. Y., Halwatura, R. U., & Rupasinghe, H. T. (2021). Modelling of vertical greenery system with selected tropical plants in urban context to appraise plant thermal performance. *Ecological Indicators*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107816>
- Pérez, G., Escolà, A., Rosell-Polo, J. R., Coma, J., Arasanz, R., Marrero, B., Cabeza, L. F., & Gregorio, E. (2021). 3D characterization of a Boston Ivy double-skin green building facade using a LiDAR system. *Building and Environment*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108320>
- Pichlhöfer, A., Korjenic, A., Sulejmanovski, A., & Streit, E. (2023). Influence of Facade Greening with Ivy on Thermal Performance of Masonry Walls. *Sustainability (Switzerland)*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/su15129546>
- Piro, P., Carbone, M., de Simone, M., Maiolo, M., Bevilacqua, P., & Arcuri, N. (2018). Energy and hydraulic performance of a vegetated roof in sub-mediterranean climate. *Sustainability (Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/su10103473>
- Poiss, M., Briefer, A., Scharf, B., Spörl, P., & Stangl, R. (2025). Vertical greenery as natural shading of glass facades: Bioshading coefficients for 4 climbing plant species for assessment of shading performance. *Building and Environment*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113399>
- Pragati, S., Shanthi Priya, R., Pradeepa, C., & Senthil, R. (2023). Simulation of the Energy Performance of a Building with Green Roofs and Green Walls in a Tropical Climate. *Sustainability (Switzerland)*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15032006>
- RAHIMI, A., IOJĂ, C. I., KHORAMROU, S., & NOBAR, Z. (2025). MODELLING NATURE-BASED SOLUTIONS IN DENSELY BUILT-UP AREAS. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 20(2), 347–361. <https://doi.org/10.26471/cjees/2025/020/338>
- Rakotondramiarana, H. T., Ranaivoarisoa, T. F., & Morau, D. (2015). Dynamic simulation of the green roofs



- impact on building energy performance, case study of Antananarivo, madagascar. *Buildings*, 5(2), 497–520. <https://doi.org/10.3390/buildings5020497>
- Ramadhan, A. M., & Mahmoud, A. H. (2023). Evaluating the efficiency of a living wall facade as a sustainable energy-saving alternative in hot arid regions. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(1). <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00259-9>
- Ren, J., Xu, X., & Jiang, J. (2025). Optimizing Public Space Quality in High-Density Old Districts of Asian Megacities: Thermal Environment Analysis of Shenzhen's Urban Fringe. *Buildings*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/buildings15132166>
- Santamouris, M. (2021). Cooling the cities: A review of reflective and green technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. Elsevier.
- Savić, S., Krstić, H., Šećerov, I., & Dunjić, J. (2024). Decreasing the energy demand in public buildings using nature-based solutions: case studies from Novi Sad (Republic of Serbia) and Osijek (Republic of Croatia). *Energy, Sustainability and Society*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-024-00455-2>
- Sayad, B., Helmi, M. R., Osra, O. A., Abed, A. M., & Alhubashi, H. H. (2024). Microscale Investigation of Urban Heat Island (UHI) in Annaba City: Unveiling Factors and Mitigation Strategies. *Sustainability (Switzerland)*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/su16020747>
- Scharf, B., & Kraus, F. (2019). Green roofs and greenpass. *Buildings*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/buildings9090205>
- Scolaro, T. P., Ghisi, E., & Silva, C. M. (2024). Effectiveness of Cool and Green Roofs Inside and Outside Buildings in the Brazilian Context. *Sustainability (Switzerland)*, 16(18). <https://doi.org/10.3390/su16188104>
- Seo, Y., Kwon, Y., & Hwang, J. (2025). Surface Energy Balance of Green Roofs Using the Profile Method: A Case Study in South Korea During the Summer. *Sustainability (Switzerland)*, 17(6). <https://doi.org/10.3390/su17062725>



- Shafique, M., & Kim, R. (2017). Application of green blue roof to mitigate heat island phenomena and resilient to climate change in urban areas: A case study from Seoul, Korea. *Journal of Water and Land Development*, 33(1), 165–170.
<https://doi.org/10.1515/jwld-2017-0032>
- Sommese, F., & Diana, L. (2025). A holistic framework for the implementation of green roofs on existing buildings: A case study in the Mediterranean climate of Naples. *Building and Environment*, 274.
<https://doi.org/10.1016/j.builenv.2025.112811>
- Soto, F. R. C., Bueno, J. de J. P., López, M. L. M., Ramos, M. E. P., Araiza, J. L. R., Jiménez, R. R., & Manzano-Ramírez, A. (2019). Sustainability metrics for housing and the thermal performance evaluation of a low-cost prototype made with poly (Ethylene terephthalate) bottles. *Recycling*, 4(3).
<https://doi.org/10.3390/recycling4030030>
- Spyrou, C., Koukoula, M., Saviolakis, P. M., Zerefos, C., Loupis, M., Masouras, C., Pappa, A., & Katsafados, P. (2024). Green Roofs as a Nature-Based Solution to Mitigate Urban Heating During a Heatwave Event in the City of Athens, Greece. *Sustainability (Switzerland)*, 16(22).
<https://doi.org/10.3390/su16229729>
- Stamenković, M. G., & Vučković, G. D. (2023). ENERGY CONSUMPTION FOR SPACE COOLING AND HEATING DEPENDING ON FLAT ROOF STRUCTURES RENOVATION: Case Study of the Healthcare Center Niš. *Thermal Science*, 27(3), 2465–2476.
<https://doi.org/10.2298/TSCI220910190S>
- Stollberg, M., & von Birgelen, A. (2023). Living Wall Plants Are Affected by and Affect Temperature: How to (not) Measure Plants' Temperature in a Living Wall Experiment. *Sustainability (Switzerland)*, 15(15).
<https://doi.org/10.3390/su15151672>
- Sylliris, N., Papagiannakis, A., & Vartholomaïos, A. (2023). Improving the Climate Resilience of Urban Road Networks: A Simulation of Microclimate and Air Quality Interventions in a Typology of Streets in Thessaloniki Historic Centre. *Land*, 12(2).
<https://doi.org/10.3390/land12020414>



- Tan, H., Kotamarthi, R., Wang, J., Qian, Y., & Chakraborty, T. C. (2023). Impact of different roofing mitigation strategies on near-surface temperature and energy consumption over the Chicago metropolitan area during a heatwave event. *Science of the Total Environment*, 860. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160508>
- Tang, Y., Gao, F., Wang, C., Huang, M. M., Wu, M., Li, H., & Li, Z. (2023). Vertical Greenery System (VGS) Renovation for Sustainable Arcade-Housing: Building Energy Efficiency Analysis Based on Digital Twin. *Sustainability (Switzerland)*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15032310>
- Teichmann, F., Horvath, A., Luisser, M., & Korjenic, A. (2022). The Impact of Small-Scale Greening on the Local Microclimate—A Case Study at Two School Buildings in Vienna. *Sustainability (Switzerland)*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/su142013089>
- Toyo Diaz, A., & Sajjadian, S. M. (2023). Simulation-based evaluation of low carbon design strategies for extreme climates. *Intelligent Buildings International*, 15(5), 191–204. <https://doi.org/10.1080/17508758.2024.2303118>
- Tseliou, A., Melas, E., Mela, A., Tsiros, I., & Zervas, E. (2023). The Effect of Green Roofs and Green Façades in the Pedestrian Thermal Comfort of a Mediterranean Urban Residential Area. *Atmosphere*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/atmos14101512>
- Turhan, C., Carpino, C., Chen Austin, M., Özbey, M. F., & Akkurt, G. G. (2025). Impact of Green Wall and Roof Applications on Energy Consumption and Thermal Comfort for Climate Resilient Buildings. *Urban Science*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/urbansci9040105>
- UN-Habitat. (2024). World cities report 2024: Cities and climate action. United Nations Human Settlements Programme.
- Wahba, S., Kamil, B., Nassar, K., & Abdelsalam, A. (2019). Green Envelop Impact on Reducing Air Temperature and Enhancing Outdoor Thermal Comfort in Arid Climates. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 5(5), 1124–1135. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091317>



- Wei, T., Jim, C. Y., Chen, Y., Chen, A., & Li, X. (2022). Complementary influence of green-roof and roof-slab thermal conductivity on winter indoor warming assessed by finite element analysis. *Energy Reports*, 8, 14852–14864. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.019>
- Wilkinson, S., & Feitosa, R. C. (2015). Retrofitting housing with lightweight green roof technology in Sydney, Australia, and Rio de Janeiro, Brazil. *Sustainability (Switzerland)*, 7(1), 1081–1098. <https://doi.org/10.3390/su7011081>
- Xiao, J., Yuizono, T., & Li, R. (2024). Synergistic Landscape Design Strategies to Renew Thermal Environment: A Case Study of a Cfa-Climate Urban Community in Central Komatsu City, Japan. *Sustainability (Switzerland)*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/su16135582>
- Yang, Y., Hu, K., Liu, Y., Wang, Z., Dong, K., Lv, P., & Shi, X. (2023). Optimisation of Building Green Performances Using Vertical Greening Systems: A Case Study in Changzhou, China. *Sustainability (Switzerland)*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/su15054494>
- Yilmaz, S., Menteş, Y., & Jamei, E. (2025). Investigating the Effect of Blue–Green Infrastructure on Thermal Condition—Case Study: Elazığ, Turkey. *Land*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/land14040891>
- Zhang, G., He, B. J., Zhu, Z., & Dewancker, B. J. (2019). Impact of morphological characteristics of green roofs on pedestrian cooling in subtropical climates. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/ijerph16020179>
- Zheng, Y., Keeffe, G., & Mariotti, J. (2023). Nature-Based Solutions for Cooling in High-Density Neighbourhoods in Shenzhen: A Case Study of Baishizhou. *Sustainability (Switzerland)*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/su15065509>
- Zhu, D., & Ooka, R. (2024). Spatiotemporal distribution of cooling effects from urban-scale rooftop mitigation strategies during high-temperature weather—A case study of the coastal Metropolis Tokyo. *Urban Climate*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.uclm.2024.102155>