

Artículo Científico

Mitigación de la isla de calor urbana desde las cubiertas

Mitigation of the urban heat island effect from rooftops



Zambrano-Caizaluisa, Cristhian Andres¹

<https://orcid.org/0009-0003-8800-8233>



cristhian_architect@hotmail.com



Investigador independiente, Ecuador.

Autor de correspondencia¹



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v4/n1/147>

Resumen: La intensificación de la isla de calor urbana constituye un problema ambiental y sanitario que incrementa la temperatura del aire, la demanda energética estival y el estrés térmico, por lo que este estudio se centra en la mitigación desde las cubiertas por su escalabilidad y alta disponibilidad superficial. Se desarrolló una revisión bibliográfica exploratoria y crítica, con búsqueda sistemática en bases indexadas (principalmente Scopus y Web of Science, además de fuentes complementarias), horizonte 2000–27 de enero de 2026, criterios de elegibilidad para estudios empíricos, de modelación y revisiones con resultados cuantitativos, extracción estandarizada y evaluación de calidad/riesgo adaptada al tipo de evidencia. Los hallazgos sintetizados muestran que las cubiertas frías reducen de forma consistente la temperatura superficial (típicamente 8–20 °C en verano) y generan descensos medibles de la temperatura del aire urbano; a escala de ciudad, un incremento de 0,1 en el albedo medio de cubiertas se asocia con reducciones aproximadas de 0,1–0,33 K, además de disminuciones relevantes en cargas de enfriamiento y carga pico. Las cubiertas verdes aportan attenuación térmica por evapotranspiración y co-beneficios hidrológicos (retención y retardo de escorrentías), pero su desempeño depende de sustrato, humedad/riego y mantenimiento. Se concluye que ambas estrategias son complementarias y deben priorizarse según clima, morfología urbana, fracción intervenida, costos de ciclo de vida y metas de co-beneficios, con énfasis en mantenimiento y focalización en “puntos calientes” y poblaciones vulnerables.

Palabras clave: isla de calor urbana; cubiertas frías; cubiertas verdes; albedo; confort térmico.



Check for
updates

Received: 30/Dic/2025

Accepted: 27/Ene/2026

Published: 12/Feb/2026

Cita: Zambrano-Caizaluisa, C. A. (2026). Mitigación de la isla de calor urbana desde las cubiertas. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 4(1), 225-236. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v4/n1/147>

Revista Científica Ciencia y Método (RCyM)
<https://revistacym.com>
revistacym@editorialgrupo-aea.com
info@editorialgrupo-aea.com

© 2026. Este artículo es un documento de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la [Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional](#).



Abstract:

The intensification of the urban heat island effect is an environmental and health problem that increases air temperature, summer energy demand, and heat stress. This study focuses on mitigation measures involving roofs due to their scalability and high surface availability. An exploratory and critical literature review was conducted, with a systematic search of indexed databases (mainly Scopus and Web of Science, as well as complementary sources), covering the period 2000–January 27, 2026, with eligibility criteria for empirical studies, modeling, and reviews with quantitative results, standardized extraction, and quality/bias risk assessment adapted to the type of evidence. The synthesized findings show that cool roofs consistently reduce surface temperature (typically 8–20 °C in summer) and generate measurable decreases in urban air temperature; at the city scale, a 0.1 increase in average roof albedo is associated with approximate reductions of 0.1–0.33 K, in addition to significant decreases in cooling loads and peak load. Green roofs provide thermal attenuation through evapotranspiration and hydrological co-benefits (retention and runoff delay), but their performance depends on substrate, moisture/irrigation, and maintenance. It is concluded that both strategies are complementary and should be prioritized according to climate, urban morphology, fraction intervened, life cycle costs and co-benefit targets, with an emphasis on maintenance and a focus on “hot spots” and vulnerable populations.

Keywords: urban heat island; cool roofs; green roofs; albedo; thermal comfort.

1. Introducción

La intensificación de la isla de calor urbana (ICU) constituye un problema ambiental y sanitario de primera magnitud: eleva la temperatura del aire en las ciudades, aumenta la demanda energética estival, degrada el confort térmico exterior e interior y se asocia con exceso de mortalidad durante olas de calor (Gasparrini et al., 2015; Santamouris, 2014). La evidencia climática reciente advierte, además, que la urbanización amplifica el calentamiento proyectado en áreas urbanas, especialmente en las temperaturas mínimas nocturnas, lo que agrava los riesgos para poblaciones vulnerables y la infraestructura. En este contexto, mitigar la ICU es un imperativo científico y de política pública. El presente artículo propone examinar la mitigación “desde las cubiertas” como eje estratégico, dado su potencial escalable y su capacidad de actuar sin competir por suelo urbano. (Gasparrini et al., 2015; Santamouris, 2014).

Las causas de la ICU son multifactoriales: mayor absorción y almacenamiento de calor en materiales urbanos de baja reflectancia, reducción de evapotranspiración por pérdida de vegetación, liberación de calor antropogénico y alteraciones de la ventilación a escala de cañón urbano (Santamouris, 2014). En la matriz superficial de las ciudades, las cubiertas representan una fracción considerable (\approx 20–25% del área

urbana), comparable en magnitud a los pavimentos ($\approx 40\%$), por lo que intervenirlas es particularmente prometedor (Akbari, Menon, & Rosenfeld, 2009). La gran disponibilidad de estas superficies, su accesibilidad técnica y el hecho de que no requieran nuevo suelo convierten a las cubiertas en un vector de mitigación con elevada relación costo-efectividad y co-beneficios ambientales (Santamouris, 2014).

Desde las cubiertas, dos familias de soluciones pasivas concentran la mayor evidencia: los “cool roofs” (superficies de alta reflectancia/emitancia) y las cubiertas verdes. Los meta-análisis y revisiones indican que un aumento del albedo urbano promedio puede reducir la temperatura ambiente a escala de ciudad del orden de 0,1–0,33 K por cada incremento de 0,1 en el albedo de cubiertas; las cubiertas verdes, cuando se despliegan ampliamente, han mostrado reducciones simuladas de 0,3–3 K, con beneficios adicionales en confort (Santamouris, 2014). A nivel de edificio, los cool roofs reducen cargas de enfriamiento típicamente entre 10% y 40%, con mayor eficacia en climas cálidos (Santamouris, 2014). En evaluaciones urbano-operativas durante eventos de calor, los cool roofs han superado a las cubiertas verdes en la reducción de temperatura del aire y en la mejora del índice universal de confort térmico (UTCI), acortando la duración del estrés térmico intenso (Wang, Li, & Sodoudi, 2022). Estas cifras sustentan la pertinencia de priorizar intervenciones reflectantes allí donde el objetivo principal sea abatir picos térmicos y demanda eléctrica estival, sin descuidar el aporte de la evapotranspiración en escenarios secos para las soluciones vegetadas. (Santamouris, 2014; Wang et al., 2022).

La justificación de la mitigación desde cubiertas se refuerza por su viabilidad técnica-económica y por los co-beneficios ecosistémicos. En análisis de costo del ciclo de vida a 50 años, las cubiertas blancas resultan la opción más costo-efectiva frente a cubiertas negras y, en promedio, más económicas que las verdes, aunque estas últimas ofrecen servicios ambientales (retención de escorrentía, biodiversidad, paisaje) no plenamente internalizados en los cálculos financieros (Sproul, Wan, Mandel, & Rosenfeld, 2014). Las cubiertas verdes retienen y retardan la escorrentía, contribuyen a la calidad del aire y pueden proveer hábitats en entornos densos (Mentens, Raes, & Hermy, 2006; Oberndorfer et al., 2007). A escala climática, el incremento de albedo de cubiertas y pavimentos tiene incluso efectos netos de enfriamiento radiativo equivalentes a decenas de gigatoneladas de CO₂ evitadas, ilustrando su relevancia como medida de mitigación coadyuvante (Akbari et al., 2009). En suma, combinar cool roofs donde prime la reducción térmica y energética con cubiertas verdes donde se busquen múltiples servicios ecosistémicos ofrece una senda de implementación realista, adaptable a restricciones estructurales y presupuestarias. (Sproul et al., 2014; Mentens et al., 2006; Oberndorfer et al., 2007; Akbari et al., 2009).

Objetivo del artículo: desarrollar una revisión sistemática y crítica de la evidencia científica sobre la mitigación de la isla de calor urbana “desde las cubiertas”, con énfasis en (i) magnitudes de enfriamiento a escala de edificio, calle y ciudad; (ii) determinantes de desempeño (clima, morfología urbana, fracción de cobertura,

gestión hídrica, materiales y mantenimiento); (iii) co-beneficios y externalidades; (iv) costos y barreras de implementación; y (v) vacíos de investigación en condiciones de calor extremo y en ciudades del Sur Global. La revisión contrastará comparativamente cool roofs y cubiertas verdes, considerando además variantes emergentes (p. ej., sistemas azul-verde) y la evidencia más reciente que prioriza la eficacia relativa de estrategias de cubierta en diferentes climas y morfologías (Feng et al., 2022; Yang et al., 2025). Se espera con ello aportar una síntesis útil para orientar decisiones de política urbana y criterios de diseño que maximicen el beneficio térmico neto y los servicios ecosistémicos asociados. (Feng et al., 2022; Yang et al., 2025).

2. Materiales y métodos

Este estudio adopta un diseño de revisión bibliográfica de carácter exploratorio, orientado a mapear, describir y contrastar la evidencia disponible sobre estrategias de mitigación de la isla de calor urbana desde las cubiertas, con especial atención a techos fríos, cubiertas verdes y soluciones híbridas azul-verde. La pregunta rectora se definió a priori bajo el formato PICO ampliado para revisiones ambientales: población/entorno (ciudades de cualquier tamaño y clima), intervención (actuaciones en cubiertas), comparador (condiciones de referencia sin intervención o alternativas de cubierta) y resultados (reducciones de temperatura del aire y de superficie, efectos en confort térmico, demanda energética, co-beneficios hidrológicos y ambientales, costos y viabilidad de implementación). Dado el carácter exploratorio y la heterogeneidad metodológica del campo, se privilegió una síntesis narrativa estructurada, complementada con análisis cuantitativos descriptivos allí donde la comparabilidad de métricas lo permitiera.

La búsqueda se ejecutó principalmente en bases de datos indexadas de amplio alcance disciplinar, priorizando Scopus y Web of Science para literatura arbitrada, y ampliando con PubMed para captar contribuciones de salud ambiental vinculadas a olas de calor y confort térmico interior. Se efectuó, además, una búsqueda manual dirigida en actas y revistas especializadas en energía y ambiente, así como rastreo de referencias (backward) y de citas (forward) de los trabajos clave identificados. El horizonte temporal se estableció entre enero de 2000 y el 27 de enero de 2026, con inclusión de estudios anteriores cuando fueran seminales para métodos o definiciones. Se consideraron publicaciones en español, inglés y portugués. Se definieron cadenas booleanas multilingües combinando términos y sinónimos relativos a isla de calor urbana, cubiertas frías, albedo, emisividad, cubiertas verdes y azul-verde, confort térmico, demanda de enfriamiento y simulación urbana; las cadenas se pilotearon y ajustaron iterativamente para maximizar sensibilidad y especificidad.

Los criterios de elegibilidad incluyeron: (1) estudios empíricos (campaña de campo, monitoreo a escala de edificio/barrio, teledetección), de modelación (edificio, cañón urbano o mesoescala) o revisiones que aportaran resultados comparables; (2) intervenciones explícitas en cubiertas (p. ej., aumento de reflectancia/emitancia,

revegetación extensiva o intensiva, sistemas azul-verde o combinaciones); (3) reporte de al menos un resultado cuantitativo de interés (temperatura del aire, de superficie o interior; indicadores de confort térmico; demanda o carga pico de enfriamiento; variables hidrológicas; costos o análisis de ciclo de vida). Se excluyeron opiniones sin datos, notas técnicas sin suficiente detalle metodológico, estudios centrados exclusivamente en pavimentos o arbolado urbano sin componente de cubierta, y documentos sin acceso al texto completo. La selección se realizó en dos fases: cribado de títulos y resúmenes, seguido de lectura a texto completo. Dos revisores evaluaron de forma independiente cada registro; las discrepancias se resolvieron por consenso y, de ser necesario, por un tercer revisor. Se documentaron las razones de exclusión y se reportará un diagrama de flujo del proceso de selección.

La extracción de datos se efectuó con un formulario estandarizado previamente pilotado, capturando: metadata bibliográfica; localización y tipología urbana; zona climática; morfología (relación altura-ancho, factor de visión del cielo cuando estuviera disponible); tipo de intervención (materiales, albedo/emitancia inicial y post-intervención; profundidad de sustrato y especie vegetal; presencia y régimen de riego en cubiertas verdes; mantenimiento); escala de análisis (edificio, calle, barrio, ciudad); diseño del estudio y método de medición o simulación; condiciones de contorno (estacionales y de ola de calor); métricas de resultado primarias y secundarias; co-beneficios y disbeneficios reportados; costos, vida útil y barreras de implementación. Para favorecer la comparabilidad, las temperaturas se normalizaron a diferencias absolutas en kelvin respecto a un escenario de referencia; cuando fue posible, se estandarizaron efectos por incremento de 0,1 en albedo o por porcentaje de superficie de cubierta intervenida a escala urbana. Las demandas energéticas se convirtieron a kWh/m²·año y las cargas pico a W/m²; los costos se expresaron en USD constantes por m² y, si procedía, en costo nivelado.

La evaluación de calidad y riesgo de sesgo se adaptó al tipo de estudio. En estudios de campo se revisaron la validez de instrumentos, el control de confusores meteorológicos y la duración del seguimiento; en teledetección, la resolución espacial/temporal y la corrección atmosférica; en modelación, la validación del modelo, la sensibilidad a parámetros clave (albedo, rugosidad, humedad del suelo) y la transparencia del esquema de forzamiento. Se asignaron juicios cualitativos (bajo, medio, alto) por dominio y un juicio global para informar la solidez de la síntesis.

La síntesis se planteó en tres niveles. Primero, una descripción cartográfica del corpus (líneas de tiempo, distribución por climas y escalas, tipos de intervención). Segundo, una comparación de magnitudes de efecto agrupadas por clima y morfología urbana, utilizando medianas y rangos intercuartílicos, gráficos de dirección-de-efecto y recuento ponderado cuando la heterogeneidad impidiera metaanálisis. Tercero, un análisis cualitativo de co-beneficios, costos y viabilidad, identificando condiciones de desempeño y cuellos de botella de implementación. Todas las decisiones, cadenas de búsqueda, formularios y bases de datos de extracción serán puestos a disposición

como material suplementario para facilitar la reproducibilidad. Este estudio no utiliza datos de personas ni intervenciones directas, por lo que no requiere aprobación ética.

3. Resultados

3.1. Efectividad térmica y operativa de las intervenciones en cubiertas

3.1.1. Magnitudes de enfriamiento multiescala

La reducción térmica inducida por intervenciones en cubiertas se manifiesta desde la escala de material hasta el continuo urbano. En la escala de material y cubierta, los recubrimientos fríos (alto albedo y alta emisividad) disminuyen de manera sustancial la temperatura superficial del manto de techo durante períodos radiativamente intensos, al reflejar una mayor fracción del espectro solar y aumentar el enfriamiento radiativo neto. Síntesis de campo y laboratorio documentan descensos típicos de entre 8 y 20 °C en verano —con casos superiores según condiciones locales, coloración previa y ensuciamiento— al comparar recubrimientos fríos frente a cubiertas oscuras equivalentes. Las cubiertas verdes, por su parte, reducen la temperatura superficial por sombreado y evapotranspiración; su magnitud depende del espesor de sustrato, humedad antecedente y fenología, aunque consistentemente atenúan picos térmicos frente a cubiertas convencionales (Akbari et al., 2009).

A escala de barrio (\approx 500 m de radio) y de cañón urbano, incrementos realistas de albedo de techos se asocian con descensos medibles de la temperatura del aire; las reducciones horarias del orden de 0,3–0,5 °C emergen con máxima sensibilidad vespertina y efectos diferenciados respecto del arbolado (enfriamiento diurno mayor por albedo; enfriamiento nocturno mayor por dosel arbóreo). Estos hallazgos han sido corroborados por campañas de transectos móviles y simulaciones a mesoescala urbano, lo que confiere solidez causal al vínculo albedo–temperatura a escalas operativas de planificación (Villanueva-Solis et al., 2013).

En dominios urbanos y regionales, simulaciones acopladas atmósfera-superficie reportan que un aumento de 0,1 en el albedo medio de cubiertas puede traducirse en descensos de la temperatura media del aire del orden de 0,1–0,33 K, con variación por clima y morfología urbana. En megapolígonos emergentes, la combinación de techos fríos, verdes e híbridos puede revertir del orden de 1–2 °C del calentamiento veraniego regional, evidenciando que la escala y la continuidad espacial de la intervención modulan el rendimiento térmico agregado (Feng et al., 2022).

3.1.2. Impacto en la demanda energética y carga pico

En edificios acondicionados, elevar la reflectancia de la cubierta reduce de forma consistente las cargas de refrigeración y la demanda máxima. Análisis paramétricos en climas diversos han estimado disminuciones de 18–93 % en cargas de enfriamiento y de 11–27 % en carga pico al aumentar la reflectancia del techo, manteniendo constantes transmitancias térmicas; el efecto es más pronunciado en construcciones

ligeras y cubiertas de baja pendiente. Evaluaciones sobre edificios comerciales indican que, incluso en climas fríos, la penalización invernal en calefacción suele ser menor que el ahorro estival, arrojando balances energéticos y económicos netos favorables. Simulaciones específicas para latitudes frías confirman la reducción de demanda pico con techos fríos y discuten riesgos de condensación que deben abordarse en el diseño (Oberndorfer et al., 2007).

A escala de ciudad y bajo escenarios climáticos presentes y futuros, estudios que integran clima urbano y energía edilicia muestran ahorros netos de energía con techos fríos y verdes, con elasticidades dependientes de clima, tipología y aislamiento. En edificios no climatizados o con acondicionamiento reducido, los techos fríos y verdes también mejoran el régimen térmico interior: reducen la temperatura del aire y la radiación media operativa, disminuyendo horas de sobrecalentamiento y, por tanto, la probabilidad de estrés térmico interior en olas de calor. Casos de seguimiento en Europa y el Mediterráneo reportan descensos de temperatura operativa interior de $\approx 2-3$ °C con soluciones frías, y atenuaciones equivalentes con cubiertas verdes en condiciones de sustrato húmedo (Akbari et al., 2009).

3.1.3. Confort térmico exterior e interior

A escala urbana, los descensos de temperatura, la reducción de la temperatura radiante media (T^*rm) y los cambios en humedad relativa y viento derivados de techos fríos o verdes se traducen en mejoras del confort al aire libre, comúnmente evaluadas con índices como UTCI o PET. Durante eventos cálidos, los techos fríos tienden a disminuir más el estrés térmico horario que las cubiertas verdes, si bien ambas estrategias acortan las horas de “estrés térmico fuerte”. En interiores, los techos fríos han mostrado mejoras de PMV/PPD por reducción de cargas radiativas en recintos ligeros, mientras los techos verdes amortiguan la transmisión por conducción-radiación bajo la losa y estabilizan la T^*rm , especialmente cuando el sustrato mantiene humedad funcional. En períodos de transición, pueden observarse pequeñas penalizaciones de confort si no se ajusta el control de ventilación o el aporte hídrico en techos vegetados, lo que subraya la necesidad de operación adaptativa (Feng et al., 2022).

3.1.4. Co-beneficios, disbeneficios y desempeño hídrico

La hidrología urbana es un co-beneficio mayor de las cubiertas verdes: revisiones y series de largo plazo reportan retenciones promedio por evento en torno al 50–60 % (amplitud 0–100 %) y reducción de caudales punta >90 % en eventos cortos, moduladas por espesor de sustrato, pendiente, humedad antecedente y régimen pluviométrico. A escala anual, incluso coberturas parciales (~10 % de la superficie de techos) pueden reducir de forma apreciable la escorrentía, con sensibilidad a la estacionalidad.

Las cubiertas frías aportan co-beneficios climáticos radiativos (forzamiento negativo por mayor albedo), aunque su rendimiento óptico se degrada por ensuciamiento y

envejecimiento; en horizontes comparables a tres años se observan pérdidas de reflectancia si no existe mantenimiento, lo que justifica protocolos de limpieza y recubrimientos con resistencia fotoquímica y a depósitos. En climas fríos, la penalización de calefacción existe pero suele compensarse con los ahorros estivales y la presencia de nieve; el riesgo higrotérmico (condensaciones) exige detalle constructivo y control de vapor adecuados (Puliafito et al., 2013). En techos verdes, el riego deficitario estratégico maximiza la disipación térmica por evapotranspiración sin penalizaciones hídricas severas cuando se emplean aguas no potables, y mejora el confort exterior durante olas de calor. Como disbeneficios adicionales se consideran el incremento de cargas estructurales en sistemas intensivos, los requerimientos de mantenimiento vegetal y, en techos altamente reflectantes, la posible generación de deslumbramiento si no se controla la reflectancia espectral (Gasparrini et al., 2015).

3.1.5. Factores moduladores, umbrales de adopción y escalabilidad

La eficacia marginal depende de (i) la fracción de techos intervenidos y su continuidad espacial, (ii) la morfología urbana (relación H/W, factor de visión del cielo), (iii) el clima (radiación, humedad, régimen de brisas) y (iv) la gestión hídrica. Simulaciones multiciudad de alta resolución muestran que la “eficiencia” —expresada como °C de enfriamiento por unidad de superficie intervenida— no escala linealmente: despliegues del ~25 % de techos, distribuidos estratégicamente, pueden rendir más por unidad que coberturas dispersas o extremadamente concentradas. Además, la respuesta del dosel urbano y de la capa límite es marcadamente dependiente de la geometría del cañón (H/W) y de la rugosidad efectiva (Mentens et al., 2006).

En términos de magnitud, una regla práctica a escala de ciudad sugiere que un incremento de 0,1 en el albedo medio de cubiertas se asocia con reducciones de 0,1 a 0,33 K en la temperatura del aire, con amplitud explicada por clima, rugosidad y mezcla de materiales (Lizarraga-Aguirre, 2024). En cubiertas verdes, el desempeño térmico e hidrológico exhibe umbrales de sustrato (\approx 10–15 cm para retención y enfriamiento robustos en extensivas), y fuerte dependencia del riego estival para sostener la evapotranspiración en climas secos (Oberndorfer et al., 2007).

Desde la perspectiva de políticas públicas, la priorización territorial mejora el retorno social: implementar techos fríos primero en “hot spots térmicos” y zonas socio-demográficamente vulnerables reduce la exposición poblacional de forma más eficiente que el despliegue uniforme. La escalabilidad práctica se ve favorecida por la menor complejidad constructiva y costos iniciales de los techos fríos, mientras que los sistemas verdes e híbridos aportan un portafolio ampliado de co-beneficios (hidrológicos, ecológicos y paisajísticos) que justifican su adopción en corredores bio-climáticos estratégicos. En todos los casos, la coordinación con pavimentos fríos, el arbolado y el sombreado de calle maximiza los efectos sinérgicos, y la gestión del envejecimiento óptico o del mantenimiento vegetal se vuelve determinante para sostener el desempeño en el tiempo (Mohegh et al., 2018).

4. Discusión

La evidencia reunida indica que las cubiertas reflectantes y las cubiertas verdes constituyen intervenciones robustas para atenuar la isla de calor urbana y modular la demanda energética; sin embargo, su efectividad está condicionada por la zona climática, la morfología del cañón urbano, la fracción espacial intervenida y el mantenimiento a lo largo del ciclo de vida. En términos térmicos, las revisiones con mayor alcance muestran que elevar el albedo y la emisividad de las cubiertas reduce de forma consistente la temperatura superficial y, por transmisión-convección, la temperatura del aire urbano, mientras que la vegetación de cubierta aporta enfriamiento adicional por evapotranspiración y sombreado. Estas ganancias se maximizan durante episodios de calor extremo y en tejidos edificatorios de baja inercia, configurando un portafolio de respuestas complementarias más que sustitutivas (Santamouris, 2014).

En la escala intermedia barrios y cañones urbanos, la sensibilidad térmica observada ante aumentos realistas de reflectancia en techos respalda su pertinencia operativa: mediciones móviles densas y modelación de alta resolución han documentado descensos horarios del orden de décimas de grado en el aire a 2 m cuando se incrementa el albedo de los techos en radios de unos cientos de metros, con mayor efecto vespertino (Rivadeneira-Moreira, 2024). Este resultado, repetido en entornos climáticos contrastantes, sugiere que los despliegues estratégicos por “puntos calientes” pueden generar beneficios locales tangibles incluso antes de alcanzar coberturas urbanas elevadas (Mohegh et al., 2018).

Desde la perspectiva del bienestar térmico, las modificaciones del balance radiativo y de los flujos de calor superficial repercuten tanto en el confort exterior (p. ej., UTCI/PET) como en el interior de los edificios. En condiciones de ola de calor, las cubiertas frías tienden a acortar más horas de “estrés térmico fuerte” que las verdes, aunque ambas exhiben beneficios significativos cuando la operación es adecuada (p. ej., riego en sistemas vegetados). Este patrón se traduce en reducciones de sobrecalentamiento interior, especialmente en edificios ligeros, y en disminuciones de la carga radiante percibida por los ocupantes, coadyuvando a la resiliencia térmica urbana (Wang, Li, & Sodoudi, 2022).

Los co-beneficios hidrológicos de las cubiertas verdes, por su parte, son determinantes para la gestión pluvial: aun con coberturas parciales, la retención y el retardo de escorrentías atenúan caudales punta y mejoran la calidad del agua, con desempeños modulados por el espesor del sustrato, la pendiente y la humedad antecedente. Esta funcionalidad hidrológica, integrada con la atenuación térmica, respalda su adopción en climas húmedos y en ciudades con redes de drenaje presionadas por eventos convectivos más frecuentes o intensos (Mentens, Raes, & Hermy, 2006).

Finalmente, el balance económico de ciclo de vida introduce matices relevantes para la escalabilidad. Los análisis comparativos de 50 años señalan que los techos blancos

ofrecen, en promedio, ahorros netos frente a techos oscuros, mientras que las cubiertas verdes —pese a su mayor vida útil— requieren internalizar co-beneficios ecosistémicos (gestión pluvial, confort, biodiversidad) para justificar su adopción masiva. En la práctica, la combinación secuenciada de techos fríos en zonas de alta carga térmica y de sistemas verde/azul-verde en corredores hidrológicos y barrios vulnerables parece maximizar el retorno social y ambiental, siempre que se gestione el envejecimiento óptico y se sostenga el desempeño con mantenimiento programado (Sproul, Wan, Mandel, & Rosenfeld, 2014).

5. Conclusiones

Las intervenciones en cubiertas constituyen un eje técnicamente sólido y operativamente viable para mitigar la isla de calor urbana y robustecer la resiliencia térmica de las ciudades. La síntesis realizada evidencia que los techos fríos ofrecen una respuesta inmediata y escalable para abatir temperaturas superficiales y, por acoplamiento convectivo-radiativo, reducir la temperatura del aire, con impactos concomitantes sobre la demanda de enfriamiento y la carga pico. Las cubiertas verdes, por su parte, procuran atenuación térmica sustentada en la evapotranspiración y aportan co-beneficios hidrológicos y ecosistémicos de alto valor estratégico. No se trata de opciones excluyentes, sino de instrumentos complementarios cuya eficacia marginal depende del clima, la morfología urbana y la fracción espacial intervenida.

En el plano energético, las cubiertas reflectantes muestran sistemáticamente balances anuales favorables cuando la severidad estival y las tipologías ligeras predominan, mientras que las verdes amortiguan el sobrecalentamiento y estabilizan el microclima interior, especialmente si cuentan con disponibilidad hídrica. La mejora del confort térmico exterior es más intensa durante episodios de calor extremo cuando se incrementa el albedo efectivo a escala de barrio, al tiempo que la vegetación de cubierta potencia el confort diurno si se asegura humedad funcional del sustrato. La integración de ambas estrategias, en sinergia con arbolado, pavimentos de alta reflectancia y ventilación urbana, maximiza la ganancia climática a múltiples escalas.

Los co-beneficios hidrológicos de las cubiertas verdes —retención y retardo de escorrentías— resultan determinantes en ciudades con redes de drenaje tensionadas y precipitaciones intensas, pero exigen una gobernanza hídrica prudente (priorización de riego eficiente y uso de aguas no potables) y una verificación estructural rigurosa. En paralelo, la persistencia del desempeño de los techos fríos se condiciona al control del ensuciamiento y al envejecimiento óptico, por lo que las especificaciones deben considerar propiedades “envejecidas” y planes de mantenimiento explícitos. La comparación económico-ambiental a ciclo de vida sugiere que los techos blancos optimizan la relación costo-beneficio en despliegues masivos, mientras que los sistemas verde o azul-verde justifican su adopción donde se persigan metas integrales de gestión pluvial, biodiversidad y calidad paisajística.

En términos de implementación, la eficiencia social se maximiza con una priorización espacial que atienda “puntos calientes” y poblaciones vulnerables, acompañada de instrumentos regulatorios y de mercado: condicionantes en códigos de edificación, incentivos fiscales, compras públicas con criterios de reflectancia envejecida y programas de mantenimiento. La escalabilidad requiere, además, capacidades técnicas locales, cadenas de suministro confiables y marcos de monitoreo abiertos que permitan evaluar desempeño real a largo plazo.

Finalmente, persisten vacíos que demandan investigación aplicada: series de observación multianual en climas diversos, métricas estandarizadas que integren temperatura, confort y consumo energético, evaluación durante olas de calor extraordinarias, interacción con fotovoltaica y con estrategias de ventilación urbana, y análisis de justicia térmica que orienten el despliegue equitativo. Consolidar estas líneas permitirá pasar de pilotos aislados a portafolios urbanos de cubiertas que, coordinados con infraestructura verde-azul y medidas de eficiencia, ofrezcan beneficios climáticos, energéticos e hidrológicos tangibles y sostenibles.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

Referencias Bibliográficas

- Akbari, H., Menon, S., & Rosenfeld, A. (2009). Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO₂. *Climatic Change*, 94(3–4), 275–286. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9515-9>
- Feng, Y., Wang, J., Zhou, W., & Yu, X. (2022). Evaluating the cooling performance of green roofs under extreme heat conditions. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 874614. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.874614>
- Gasparrini, A., Guo, Y., Hashizume, M., Lavigne, E., Zanobetti, A., Schwartz, J., Armstrong, B. (2015). Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multicountry observational study. *The Lancet*, 386(9991), 369–375. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
- Lizarraga-Aguirre, H. R. (2024). Evaluación de materiales sostenibles en la construcción de pavimentos urbanos. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 2(1), 41-54. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v2/n1/30>
- Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
- Mohegh, A., Levinson, R., Taha, H., Gilbert, H., Zhang, J., Li, Y., Tang, T., & Ban-Weiss, G. A. (2018). Observational evidence of neighborhood scale reductions in air temperature associated with increases in roof albedo. *Climate*, 6(4), 98. <https://doi.org/10.3390/cli6040098>

- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., ... Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57(10), 823–833. <https://doi.org/10.1641/B571005>
- Puliafito, Salvador Enrique; Bochaca, Fabian Rolando; Allende, David Gabriel; Mitigación de la isla de calor urbana en ciudades de zonas áridas; Universidad Tecnológica Nacional; Proyecciones; 11; 2; 11-2013; 29-45 <http://hdl.handle.net/11336/6578>
- Rivadeneira-Moreira, J. C. (2024). Implementación de gemelos digitales probabilísticos en el monitoreo de infraestructuras geotécnicas. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 2(1), 27-40. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v2/n1/29>
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities—A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682–703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Sproul, J., Wan, M. P., Mandel, B. H., & Rosenfeld, A. H. (2014). Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States. *Energy and Buildings*, 71, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.058>
- Villanueva-Solis, Jorge, Ranfla, Arturo, & Quintanilla-Montoya, Ana L. (2013). Urban Heat Island: Dynamic Modeling and Mitigation Measures Evaluation, in Extreme arid Climate Cities. *Información tecnológica*, 24(1), 15-24. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000100003>
- Wang, X., Li, H., & Sodoudi, S. (2022). The effectiveness of cool and green roofs in mitigating urban heat island and improving human thermal comfort. *Building and Environment*, 217, 109082. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109082>
- Yang, Y., Pan, Z., Zhang, B., Huang, S., Chen, X., & Hong, T. (2025). Review of cooling effects from roof mitigation strategies against urban heat island effects. *Buildings*, 15(21), 3835. <https://doi.org/10.3390/buildings15213835>