

Análisis de los mecanismos, eficacia y escalabilidad de la infraestructura verde urbana para mitigar islas de calor

Analysis of the mechanisms, effectiveness, and scalability of urban green infrastructure for mitigating heat islands

Análise dos mecanismos, eficácia e escalabilidade da infraestrutura verde urbana para mitigar ilhas de calor

Suárez-Loor, Cristina Paola
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
csuarezl@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-6588-7018>



Morán-Navarro, Diana Susana
Universidad de Especialidades Espíritu Santo
dsmoran21@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0009-8394-9046>



Alvarez-Laborde, Omar Arturo
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
aalvarezl@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0007-7657-5977>



Suárez-Loor, Bruno Eduardo
Universidad San Gregorio de Portoviejo
e.besuares@sangregorio.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-0686-1728>



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/nE2/1138>

Como citar:

Suárez-Loor, C. P., Morán-Navarro, D. S., Alvarez-Laborde, O. A., & Suárez-Loor, B. E. (2025). Análisis de los mecanismos, eficacia y escalabilidad de la infraestructura verde urbana para mitigar islas de calor. *Código Científico Revista De Investigación*, 6(E2), 1835–1853..

Recibido: 20/08/2025

Aceptado: 16/09/2025

Publicado: 30/09/2025

Resumen

Este estudio revisa críticamente cómo la infraestructura verde urbana (IVU) mitiga las islas de calor urbanas mediante sombreado, evapotranspiración, modificación del balance radiativo y de la rugosidad aerodinámica, con el objetivo de evaluar mecanismos, eficacia comparada y condiciones de escalabilidad. Se aplicó una revisión exploratoria de alcance con protocolo previo: búsquedas bibliográficas iterativas, criterios de elegibilidad por ámbito/intervención/resultados/diseño, cribado en dos etapas por revisores independientes, extracción estandarizada, valoración de calidad y síntesis mixta (mapeo, análisis temático y conteo de votos, evitando meta-análisis ante alta heterogeneidad). Los hallazgos indican que el arbolado viario reduce picos diurnos por sombra; parques y corredores generan “halos” de enfriamiento que crecen no linealmente con tamaño y conectividad; techos y muros verdes moderan sobre todo temperatura de superficie y ganan impacto cuando se despliegan masivamente o en portafolios híbridos con superficies frías. El rendimiento depende del clima, la morfología y la disponibilidad hídrica; existen umbrales de masa crítica de dosel; y la escalabilidad exige gobernanza, mantenimiento y monitoreo comparables. Se concluye que la IVU es eficaz y multifuncional, pero contexto-dependiente; conviene combinar tipologías, seleccionar especies tolerantes y usar riego eficiente, priorizando la justicia térmica.

Palabras clave: infraestructura verde urbana; isla de calor urbana; evapotranspiración; sombreado; escalabilidad.

Abstract

This study critically reviews how urban green infrastructure (UGI) mitigates urban heat islands through shading, evapotranspiration, modification of the radiation balance, and aerodynamic roughness, with the aim of evaluating mechanisms, comparative effectiveness, and conditions for scalability. An exploratory scoping review with a predefined protocol was applied: iterative literature searches, eligibility criteria by scope/intervention/outcomes/design, two-stage screening by independent reviewers, standardized extraction, quality assessment, and mixed synthesis (mapping, thematic analysis, and vote counting, avoiding meta-analysis due to high heterogeneity). The findings indicate that roadside trees reduce daytime peaks through shade; parks and corridors generate cooling “halos” that grow non-linearly with size and connectivity; green roofs and walls mainly moderate surface temperature and gain impact when deployed on a large scale or in hybrid portfolios with cool surfaces. Performance depends on climate, morphology, and water availability; there are critical canopy mass thresholds; and scalability requires comparable governance, maintenance, and monitoring. It is concluded that UHI is effective and multifunctional, but context-dependent; it is advisable to combine typologies, select tolerant species, and use efficient irrigation, prioritizing thermal justice.

Keywords: urban green infrastructure; urban heat island; evapotranspiration; shading; scalability.

Resumo

Este estudo analisa criticamente como a infraestrutura verde urbana (IVU) atenua as ilhas de calor urbanas por meio de sombreado, evapotranspiração, modificação do equilíbrio radiativo e da rugosidade aerodinâmica, com o objetivo de avaliar mecanismos, eficácia comparativa e condições de escalabilidade. Foi aplicada uma revisão exploratória de alcance com protocolo prévio: pesquisas bibliográficas iterativas, critérios de elegibilidade por âmbito/intervenção/resultados/design, triagem em duas etapas por revisores independentes, extração padronizada, avaliação de qualidade e síntese mista (mapeamento, análise temática e

contagem de votos, evitando meta-análises devido à alta heterogeneidade). Os resultados indicam que as árvores nas vias reduzem os picos diurnos por meio da sombra; parques e corredores geram “halos” de resfriamento que crescem de forma não linear com o tamanho e a conectividade; telhados e paredes verdes moderam principalmente a temperatura da superfície e ganham impacto quando implantados em grande escala ou em portfólios híbridos com superfícies frias. O desempenho depende do clima, da morfologia e da disponibilidade hídrica; existem limiares de massa crítica de copa; e a escalabilidade exige governança, manutenção e monitorização comparáveis. Conclui-se que a IVU é eficaz e multifuncional, mas dependente do contexto; convém combinar tipologias, selecionar espécies tolerantes e usar irrigação eficiente, priorizando a justiça térmica.

Palavras-chave: infraestrutura verde urbana; ilha de calor urbana; evapotranspiração; sombreamento; escalabilidade.

Introducción

Las islas de calor urbanas (ICU) se han intensificado por la expansión de superficies impermeables de alta inercia térmica y por la pérdida de cobertura vegetal, con efectos acumulativos sobre la salud pública, el consumo energético y la inequidad térmica intraurbana. El incremento de extremos cálidos y olas de calor previsto para las próximas décadas acentúa la urgencia de intervenciones basadas en la naturaleza capaces de atenuar la temperatura del aire a escala de calle y de barrio (p. ej., árboles alineados, parques, techos y muros verdes). En este contexto, la infraestructura verde urbana (IVU) emerge como estrategia prioritaria por combinar mecanismos biofísicos de sombreamiento, evapotranspiración, modificación del balance radiativo y cambio de la rugosidad aerodinámica, con beneficios colaterales en salud, biodiversidad y drenaje urbano (Gunawardena et al., 2017; Norton et al., 2015; Santamouris, 2014).

El planteamiento del problema se centra en comprender, de manera comparativa y multiescalar, qué mecanismos de la IVU contribuyen más a la atenuación térmica, con qué eficacia relativa bajo diferentes climas urbanos y cómo escalar estas soluciones a redes funcionales a nivel de ciudad. Evidencia reciente indica que el dosel arbóreo reduce de forma no lineal la temperatura diurna y que su efecto se potencia a escalas espaciales mayores, mientras la reducción de superficie impermeable beneficia sobre todo la atenuación nocturna

(Ziter et al., 2019). Asimismo, síntesis globales muestran que parques y corredores verdes bien configurados pueden disminuir la temperatura del aire y la de superficie en magnitudes relevantes para el confort térmico, si bien la intensidad y la distancia de enfriamiento dependen del tamaño, la forma y el contexto morfológico circundante (Wang et al., 2022).

Entre los factores o afectaciones del problema destacan: (i) la variabilidad climática de fondo, que modula el rendimiento de la IVU —por ejemplo, en climas áridos el enfriamiento por vegetación puede ser mayor pero también más sensible a la disponibilidad hídrica—; (ii) la respuesta ecofisiológica de los árboles durante calor extremo, cuando el cierre estomático limita la evapotranspiración y traslada el protagonismo del sombreado como mecanismo dominante; y (iii) la heterogeneidad urbana (altura de edificios, cañones urbanos, materiales), que condiciona ventilación y advección del aire más fresco desde “islas verdes” hacia áreas adyacentes (Norton et al., 2015; Gunawardena et al., 2017). Estas interacciones explican por qué los resultados no son universalmente transferibles y por qué se requieren criterios de diseño específicos al clima local y a la morfología urbana.

La justificación y viabilidad de una revisión bibliográfica reside en (a) sintetizar la evidencia dispersa sobre mecanismos (sombra, evapotranspiración, albedo, rugosidad), (b) comparar la eficacia relativa de tipologías de IVU (árboles de calle, parques, techos y muros verdes) y (c) evaluar la escalabilidad desde intervenciones puntuales hacia sistemas conectados de “corredores frescos”, con criterios de costo-efectividad y equidad espacial. Estudios epidemiológicos y de salud pública por ejemplo, en ciudades europeas, muestran que aumentar la cobertura arbórea puede reducir temperaturas y evitar mortalidad atribuible a ICU, reforzando la pertinencia de inversiones en IVU como medida de adaptación climática (Lungman et al., 2023). Al mismo tiempo, marcos de priorización integran termografía, datos censales y métricas de vulnerabilidad para ubicar la IVU donde más población expuesta se beneficia, optimizando el rendimiento térmico por unidad de inversión (Norton et al., 2015).

Finalmente, análisis a escala continental señalan que la IVU en más de 600 áreas funcionales urbanas de Europa contribuye de modo significativo a la regulación microclimática estival, lo que respalda su viabilidad programática a gran escala (Marando et al., 2021).

No obstante, la escalabilidad enfrenta condicionantes operativos: costos de implementación y mantenimiento, disponibilidad hídrica en periodos secos, y la necesidad de estándares para monitorear desempeño térmico (métricas comparables de temperatura del aire versus de superficie). La literatura subraya que, aun cuando el enfriamiento evaporativo puede reducirse en olas de calor por estrés hídrico, el sombreado de copas densas mantiene beneficios consistentes; por ello, la selección de especies y arreglos estructurales debe equilibrar altura, densidad foliar y tolerancia a sequía (Ziter et al., 2019). A nivel de diseño urbano, techos verdes y superficies de alto albedo actúan de forma complementaria a la IVU, mejorando la eficacia térmica cuando el espacio para arbolado es limitado (Santamouris, 2014).

Objetivo del artículo: realizar un análisis crítico de los mecanismos, eficacia y escalabilidad de la IVU para mitigar ICU, integrando evidencia de revisiones sistemáticas y estudios empíricos recientes. Específicamente, se propone (1) caracterizar los mecanismos primarios y sus interacciones bajo distintos climas; (2) comparar la eficacia de tipologías de IVU y su desempeño frente a alternativas complementarias (p. ej., techos fríos); y (3) derivar principios de diseño y gobernanza para escalar corredores y redes verdes con criterios de costo-efectividad y justicia térmica. De este modo, la revisión busca traducir conocimiento científico en pautas operativas para la planificación urbana climáticamente sensible, contribuyendo a ciudades más habitables y resilientes.

Metodología

La metodología adoptada corresponde a una revisión exploratoria de alcance, orientada a mapear, caracterizar y sintetizar críticamente la evidencia disponible sobre los mecanismos,

la eficacia y la escalabilidad de la infraestructura verde urbana para mitigar islas de calor. Se registró un protocolo interno previo que definió objetivos, preguntas guía, fuentes de información, criterios de elegibilidad, procedimientos de cribado y plan de síntesis. La pregunta directriz se formuló así: “¿Qué mecanismos biofísicos emplea la infraestructura verde urbana para reducir temperaturas urbanas, con qué eficacia bajo distintos contextos climáticos y morfológicos, y qué condiciones permiten escalar dichas intervenciones a nivel de red o ciudad?”. Como subpreguntas se consideraron: (i) ¿qué métricas térmicas se emplean y a qué escalas espaciales y temporales?, (ii) ¿qué tipologías de infraestructura verde urbana muestran mayor rendimiento relativo según clima, densidad y morfología?, y (iii) ¿qué factores técnicos, operativos y de gobernanza condicionan su escalabilidad?

El marco de elegibilidad se definió con base en cinco ejes: población/ámbito (ciudades y áreas urbanas o periurbanas en cualquier región), intervención (árboles de calle, parques, corredores verdes, techos y muros verdes, soluciones de albedo asociadas cuando se evalúan en combinación con vegetación), comparadores (escenarios sin intervención, tipologías alternativas o periodos preintervención), resultados (temperatura del aire, temperatura de superficie, índices compuestos de confort térmico y medidas de excedente térmico urbano) y diseño de estudio (observacionales, cuasiexperimentales, experimentales y de modelización, además de revisiones previas con síntesis cuantitativa o cualitativa). Se incluyeron publicaciones en español e inglés sin restricción geográfica y con ventana temporal amplia para capturar la evolución del campo. Se excluyeron notas de prensa, materiales de opinión no evaluados por pares y documentos sin resultados empíricos o sin métodos reproducibles.

La estrategia de búsqueda combinó descriptores controlados y términos libres en bases de datos bibliográficas internacionales. Se elaboraron cadenas de búsqueda con operadores booleanos, truncamientos y proximidad, incorporando sinónimos y variantes ortográficas. Se aplicaron filtros por tipo de documento (artículos de revista), área temática y disponibilidad del

texto completo. Las búsquedas se iteraron en ciclos, con refinamientos sucesivos tras la revisión piloto de resultados para optimizar sensibilidad y especificidad. Se complementó la identificación de estudios con rastreo de referencias hacia atrás y hacia adelante y con búsquedas manuales en revistas clave del área. Todas las operaciones se documentaron en un cuaderno de bitácora metodológico que registra fechas, bases, cadenas, conteos y decisiones.

El proceso de cribado se realizó en dos etapas. Primero, dos revisores evaluaron de manera independiente títulos y resúmenes respecto de los criterios de elegibilidad. Segundo, los artículos potencialmente relevantes pasaron a lectura de texto completo para confirmar su inclusión. Las discrepancias se resolvieron por consenso y, de ser necesario, mediante la intervención de un tercer revisor. Para asegurar consistencia, se efectuó una calibración inicial con un conjunto de estudios piloto y se establecieron reglas operativas para casos límite (por ejemplo, cuando la intervención combinaba vegetación con medidas no vegetales).

La extracción de datos siguió una plantilla previamente definida y testeada, que abarcó: características bibliométricas; localización geográfica y zona climática; escala de análisis (sitio, calle, barrio, ciudad); tipología de infraestructura verde; diseño y periodo de estudio; métodos de medición o modelización; métricas térmicas reportadas (incluyendo definición operacional, instrumentos y resolución temporal); mecanismos atribuidos (sombra, evapotranspiración, albedo, rugosidad/ventilación); magnitud del efecto térmico (con signo, unidad y momento del día); factores contextuales (cobertura arbórea, impermeabilización, morfología urbana); y elementos de escalabilidad (costos reportados, requerimientos de mantenimiento, disponibilidad hídrica, arreglos institucionales, instrumentos de planificación y criterios de priorización). Cuando fue posible, se registraron medidas de incertidumbre asociadas a los resultados.

La evaluación de calidad y riesgo de sesgo se llevó a cabo con listas de verificación adaptadas al tipo de estudio (observacional, experimental o de modelización), considerando

aspectos de validez interna (claridad de la intervención, control de confusores, robustez de las métricas térmicas) y externa (transferibilidad a otros climas y morfologías). Esta valoración no actuó como filtro de exclusión, sino como insumo para ponderar el peso de la evidencia en la síntesis.

La síntesis de resultados combinó tres niveles. Primero, un mapeo descriptivo del corpus para caracterizar tendencias, vacíos y distribución de los estudios por clima, tipología y métrica. Segundo, una síntesis temática que articuló los mecanismos con los contextos de mayor rendimiento y con los condicionantes de escalabilidad, apoyada en codificación inductivo–deductiva. Tercero, cuando la homogeneidad de definiciones, métricas y escalas lo permitió, se elaboraron resúmenes cuantitativos de efectos mediante estadística descriptiva y conteo de votos, evitando agregación meta-analítica cuando la heterogeneidad metodológica lo desaconsejó. Se efectuaron análisis de sensibilidad al excluir estudios con alta incertidumbre o con riesgo de sesgo elevado y se exploró la coherencia de resultados diurnos y nocturnos.

Finalmente, se implementó una gestión transparente de datos y decisiones: las tablas de elegibilidad, matrices de extracción y reglas de síntesis fueron archivadas en repositorio interno junto con un diagrama de flujo del proceso de selección. La reproducibilidad se garantizó mediante documentación exhaustiva de cada etapa, mantenimiento de registros de versiones y verificación cruzada de una muestra aleatoria de extracciones.

Resultados

Rendimiento térmico de la infraestructura verde urbana (IVU)

La infraestructura verde urbana (IVU) activa un conjunto articulado de procesos biofísicos —provisión de sombra, evapotranspiración, ajuste del balance radiativo y modificación de la rugosidad aerodinámica— que redistribuyen los flujos de energía y materia dentro del tejido urbano. Estos procesos, actuando de forma sinérgica, atenúan la carga térmica

percibida por peatones y edificaciones, al tiempo que alteran la partición entre calor sensible y latente y regulan el almacenamiento térmico de superficies minerales. No existe, sin embargo, una respuesta térmica única o universal: el rendimiento de la IVU está condicionado por el régimen climático de referencia, la morfología edilicia, la composición de materiales y la estructura espacial del verde (tipo, tamaño, continuidad y conectividad). En la práctica, la combinación adecuada de mecanismos puede traducirse en reducciones medibles tanto de la temperatura del aire como de la temperatura de la superficie, con implicaciones directas para el confort térmico, la demanda energética y la mitigación de la isla de calor urbana (Oke, Mills, Christen, & Voogt, 2017; Bowler, Buyung-Ali, Knight, & Pullin, 2010; Santamouris, 2014).

Mecanismos dominantes según condiciones meteorológicas

Bajo condiciones templadas y con suficiente humedad del suelo, la evapotranspiración emerge como proceso preponderante: el excedente energético se canaliza hacia calor latente, disminuyendo el calor sensible y, por ende, las temperaturas del aire en el estrato peatonal. Este “desacople” entre radiación incidente y calentamiento del aire resulta especialmente eficaz cuando el follaje mantiene una conductancia estomática elevada y la disponibilidad hídrica permite sostener flujos evaporativos durante gran parte del día. En contraste, durante olas de calor o periodos de sequía edáfica, los árboles restringen la transpiración para evitar el estrés hídrico; en ese escenario, la sombra de la copa asume el protagonismo al reducir la irradiancia de onda corta sobre pavimentos y fachadas, moderar la temperatura radiante media y limitar el calentamiento de la capa límite inmediata a las personas. Paralelamente, la rugosidad aerodinámica impuesta por el dosel vegetal modifica la estructura del flujo dentro del cañón urbano, favoreciendo la mezcla vertical y la ventilación transversal cuando existen gradientes de presión y corredores de viento. Este reordenamiento de los mecanismos —de latente a sombra y, finalmente, a ventilación–convección— no es estático: varía a lo largo del día (p. ej., máximos de sombra al mediodía, mayor influencia de la ventilación al atardecer) y entre

estaciones, y se manifiesta de manera distinta según la métrica térmica seleccionada (temperatura del aire frente a temperatura de superficie), lo que explica diferencias en la magnitud de los beneficios reportados por la literatura (Rahman et al., 2021; Santamouris, 2014).

Eficacia comparada por tipología y escala

La arboreización viaria suele ofrecer ganancias inmediatas por el efecto de sombreado directo dentro de cañones urbanos, reduciendo picos de temperatura diurna y atenuando la carga radiativa sobre peatones y envolventes de edificios. Su desempeño mejora cuando existe continuidad del dosel, copas amplias y relaciones altura–anchura de calle que permitan interceptar la radiación solar en los horarios de mayor carga térmica. En contraste, los parques y corredores verdes operan con una lógica de “fuente–sumidero” térmico: grandes superficies vegetadas generan gradientes de temperatura que impulsan la advección de aire más fresco hacia áreas contiguas, produciendo los llamados “halos de enfriamiento”. La intensidad y alcance espacial de esos halos dependen del tamaño absoluto del parche, su compacidad, la conectividad con otros elementos verdes y la configuración morfológica que facilite la ventilación. Por su parte, los techos y muros verdes se especializan en moderar la temperatura de superficie (limitando el calentamiento de la piel del edificio) y en suavizar los picos térmicos en la capa de aire inmediatamente adyacente; sus efectos sobre la temperatura del aire a escala de calle tienden a ser modestos salvo cuando se implementan de forma masiva o se combinan con superficies frías de alto albedo, configurando portafolios híbridos que suman beneficios radiativos y evaporativos. A escala de barrio y ciudad, la evidencia sugiere la existencia de umbrales de masa crítica de dosel por encima de los cuales los beneficios térmicos crecen de manera más que proporcional, especialmente en veranos persistentes o con materiales urbanos de alta inercia (Bowler et al., 2010; Kong, Yin, James, Hutyra, & He, 2014; Marando et al., 2021; Santamouris, 2014).

Sensibilidad al contexto urbano

El rendimiento térmico de la IVU es altamente dependiente del contexto. Primero, en paisajes con elevada impermeabilización y abundancia de superficies oscuras, incrementos marginales del dosel arbóreo producen descensos diurnos del aire más acusados que en barrios ya vegetados; en cambio, la mitigación nocturna está más asociada a la capacidad de ventilación del sitio y a la menor acumulación de calor en materiales con baja inercia térmica. Segundo, la escala de análisis condiciona las relaciones detectables: correlaciones robustas entre cobertura arbórea y temperatura que son visibles a radios de 60–90 m (escala de manzana) pueden diluirse o invertirse a radios muy cortos (10–30 m) debido a sombras proyectadas, orientaciones de calle y heterogeneidad de materiales. Tercero, la morfología urbana —proporción altura/anchura del cañón, orientación respecto del sol y del viento dominante, continuidad de fachadas— determina cuánto y cuándo la sombra penetra en la sección de calle y en qué medida el aire más fresco proveniente de “islas verdes” puede desplazarse hacia zonas adyacentes (Ziter, Pedersen, Kucharik, & Turner, 2019; Kong et al., 2014). Cañones profundos y estrechos tienden a limitar el rendimiento del sombreado en determinadas horas, pero pueden incrementar el valor relativo de la evapotranspiración cuando existe agua disponible, al sostener microclimas más húmedos en el estrato peatonal. Estas sensibilidades recomiendan interpretar la evidencia con estratificaciones por clima, morfología y métrica térmica, evitando extrapolaciones lineales entre ciudades con configuraciones distintas en la siguiente figura 1 se evidencia la inversión y el financiamiento en políticas de infraestructura verde determinan qué tan efectivos son estos componentes para mitigar el calor y mejorar el confort térmico.

Figura 1*Factores determinantes del rendimiento térmico en la Infraestructura Verde Urbana*

Nota: La IVU enfría la ciudad cuando ciencia, normativa e inversión se alinean con árboles y buen diseño urbano (Autores, 2025).

Condicionantes de escalabilidad y mantenimiento

La expansión de redes verdes con desempeño térmico comprobable exige coordinar decisiones hidrológicas, biológicas y operativas. Sustituir extensos céspedes irrigados por vegetación xerófita sin aporte hídrico puede disminuir el consumo de agua, pero también elevar la temperatura diurna al reducir el componente latente del balance de energía; por ello, la eficiencia hídrica debe balancearse con la necesidad de mantener flujos evaporativos suficientes mediante riegos estratégicos (p. ej., deficitarios controlados, uso de agua no potable) y mediante la selección de especies con alta eficiencia en uso de agua y tolerancia a calor. A la escala de sistemas urbanos completos, incrementos sostenidos de cobertura arbórea han mostrado ser una vía robusta para moderar temperaturas estivales, siempre que se alcance una masa crítica y se asegure la transpiración durante los meses más cálidos. En el plano operativo, la gestión del ciclo de vida —desde la plantación y el establecimiento hasta la poda estructural y el control sanitario— es decisiva para que las inversiones se traduzcan en copas maduras y estables: reducir la mortalidad juvenil evita reposiciones costosas y preserva la continuidad del

servicio térmico a lo largo del tiempo. Finalmente, la gobernanza de la red verde debe estandarizar métricas y protocolos de monitoreo (temperatura del aire y de superficie, temperatura radiante media, indicadores de confort), asegurar series de tiempo comparables y orientar la priorización espacial con base en vulnerabilidad térmica y co-beneficios (salud, drenaje urbano sostenible, biodiversidad), de modo que la mitigación del calor se integre con objetivos más amplios de resiliencia urbana (Vahmani & Ban-Weiss, 2016; Marando et al., 2021; Oke et al., 2017; Bowler et al., 2010).

Discusión

La evidencia sintetizada en esta revisión converge en que la infraestructura verde urbana (IVU) mitiga la carga térmica mediante una combinación jerárquica de procesos — evapotranspiración, sombreado y modificación de la rugosidad/ventilación— cuya preponderancia varía con el estado hídrico y las condiciones meteorológicas de fondo. En escenarios con humedad edáfica disponible, el desvío del balance energético hacia el calor latente reduce de manera tangible la temperatura del aire y mejora el confort térmico; bajo olas de calor y sequía, en cambio, la limitación estomática merma la transpiración y el sombreadamiento del dosel se convierte en el mecanismo dominante para amortiguar la carga radiativa a nivel peatonal (Rahman et al., 2021; Santamouris, 2014). Esta plasticidad funcional explica parte de la heterogeneidad observada entre ciudades y estaciones, y justifica la creciente demanda de métricas y protocolos comparables para distinguir efectos sobre temperatura del aire frente a temperatura de superficie, dado que ambos indicadores responden de manera diferencial a los mismos arreglos verdes (Bowler, Buyung-Ali, Knight, & Pullin, 2010).

Al comparar tipologías y escalas, los resultados sugieren que el arbolado viario produce atenuaciones inmediatas en cañones urbanos por efecto de la sombra directa, mientras que parques y corredores verdes generan halos de enfriamiento que trascienden sus límites formales

cuando alcanzan superficies críticas y conectividad funcional; la magnitud y persistencia espacial del beneficio crece de manera no lineal con el tamaño del parche y su compacidad (Kong, Yin, James, Hutyra, & He, 2014; Marando et al., 2021). De forma complementaria, techos y muros verdes inciden con mayor claridad en la temperatura de superficie que en la del aire, pero su contribución al entorno térmico se vuelve significativa cuando se despliegan masivamente o se combinan con superficies de alto albedo, lo que apunta a portafolios híbridos que suman mecanismos (Santamouris, 2014). De esta lectura se desprende una implicación operativa: no existe una “bala de plata”; la eficacia térmica óptima emerge del acoplamiento de soluciones verdes y grises según restricciones espaciales, hidrológicas y morfológicas.

La sensibilidad del rendimiento térmico al contexto urbano tensiona las generalizaciones apresuradas. En barrios con alta impermeabilización, incrementos modestos del dosel pueden generar descensos diurnos del aire sustantivos, mientras que la mitigación nocturna depende más de la reducción de la inercia térmica y del acceso a ventilación (Ziter, Pedersen, Kucharik, & Turner, 2019). Además, la escala analítica condiciona las inferencias: asociaciones entre cobertura de copa y temperatura se intensifican al pasar de radios de 10–30 m a 60–90 m, lo que obliga a alinear la resolución de las métricas de paisaje con las variables térmicas para evitar sesgos de escala (Ziter et al., 2019). La morfología urbana —relación altura/anchura, orientación y continuidad de fachadas— modula la penetración del sombreado y la advección de aire más fresco desde parches vegetados; en cañones profundos, la sombra puede ser parcial y efímera, pero la rugosidad adicional del dosel y los gradientes de humedad pueden potenciar la renovación de aire si el régimen de vientos lo permite (Kong et al., 2014). Estas interacciones respaldan la necesidad de guías de diseño climáticamente sensibles y específicas al sitio, que incorporen análisis multiescala y de vecindad.

Un corolario crítico es la tensión entre conservación del recurso hídrico y confort térmico. Sustituir céspedes irrigados por vegetación xerófita sin riego reduce la demanda de agua, pero también la fracción de energía convertida en calor latente, pudiendo inducir calentamiento diurno del aire del orden de ~ 2 °C en climas semiáridos, con implicaciones para el bienestar térmico y la demanda energética de refrigeración (Vahmani & Ban-Weiss, 2016). Lejos de desacreditar la IVU, este resultado sugiere que la escalabilidad debe apoyarse en estrategias de riego de alta eficiencia (p. ej., deficitario, aguas regeneradas) y en paletas vegetales con elevada eficiencia en uso de agua y resiliencia a estrés térmico. De igual modo, la selección de especies y configuraciones estructurales que maximizan sombra sostenida en horas críticas —copas amplias, follaje denso pero no excesivamente restrictivo al viento— tiende a ofrecer beneficios robustos incluso cuando la evapotranspiración se contrae en eventos extremos (Rahman et al., 2021).

Los análisis a escala continental refuerzan la viabilidad programática. En más de seiscientas áreas urbanas europeas, el aumento de cobertura arbórea se asocia con una moderación significativa de las temperaturas estivales, lo que avala intervenciones de alcance metropolitano siempre que se alcance masa crítica de dosel y se mantenga la funcionalidad ecofisiológica en verano (Marando et al., 2021). Sin embargo, traducir ese potencial a resultados estables exige gobernanza y mantenimiento acordes al ciclo de vida arbóreo: plantaciones de calidad, riego de establecimiento, podas estructurales tempranas, manejo fitosanitario preventivo y reposiciones oportunas reducen mortalidad juvenil y evitan pérdidas de rendimiento térmico por fallas evitables (McPherson, van Doorn, & de Goede, 2016). La economía política de la IVU, por tanto, debe evaluarse en horizonte intertemporal, internalizando co-beneficios —salud, drenaje, biodiversidad y estética urbana— que amortizan costos operativos y fortalecen la legitimidad social de las inversiones.

A la luz de la base de evidencia, tres vacíos merecen atención. Primero, la falta de estandarización en métricas y protocolos limita la comparabilidad entre estudios y la transferencia entre climas. Diferenciar de manera sistemática temperatura del aire, temperatura de superficie y variables radiativas (p. ej., temperatura radiante media) permitiría aislar mecanismos y optimizar diseños (Bowler et al., 2010; Oke, Mills, Christen, & Voogt, 2017). Segundo, persiste una subrepresentación de análisis nocturnos y estacionales largos: la mayoría de las evaluaciones se concentran en el máximo diurno estival, pese a que la morfología y la inercia térmica condicionan la retención de calor nocturna y el confort en transición. Tercero, la dimensión de equidad térmica requiere integración operativa en la priorización: evidencias de salud pública sugieren que aumentar cobertura arbórea en barrios vulnerables puede evitar mortalidad atribuible al calor, pero los programas deben asegurar mantenimiento y disponibilidad hídrica sostenibles para no reproducir brechas en el tiempo (Lungman et al., 2023).

Finalmente, esta discusión refrenda una tesis pragmática: la IVU es un modulador térmico eficaz y multifuncional, pero su rendimiento máximo emerge cuando se diseña como red, se calibra al clima y la morfología locales, y se gestiona con estándares que alinean hidrología, silvicultura y monitoreo. La investigación futura debería combinar experimentación in situ y modelización acoplada atmósfera-superficie para cuantificar umbrales de tamaño y conectividad, estimar rendimientos marginales decrecientes y probar portafolios híbridos verde-gris bajo escenarios de calor extremo. Con ese andamiaje metodológico y de gobernanza, los sistemas urbanos pueden transitar de intervenciones puntuales a corredores frescos de escala urbana con beneficios térmicos, sanitarios y socioambientales duraderos (Oke et al., 2017; Santamouris, 2014; Marando et al., 2021).

Conclusión

La revisión confirma que la infraestructura verde urbana constituye un modulador térmico eficaz y multifuncional cuya actuación se sustenta en una jerarquía dinámica de procesos: cuando existe humedad disponible, la evapotranspiración domina y desplaza el balance energético hacia el calor latente; bajo olas de calor y estrés hídrico, el sombreado del dosel y la modificación de la rugosidad pasan a ser los pilares del enfriamiento operativo. Este comportamiento plástico explica gran parte de la variabilidad interurbana y estacional observada, y subraya la necesidad de seleccionar métricas térmicas coherentes con la pregunta de gestión (temperatura del aire, de superficie o variables radiativas) para evaluar el rendimiento real de las intervenciones.

Comparativamente, el arbolado viario ofrece enfriamientos inmediatos a escala de calle, mientras que parques y corredores generan halos de enfriamiento cuyo alcance crece de forma no lineal con el tamaño y la conectividad. Techos y muros verdes aportan beneficios puntuales y se potencian al integrarse en portafolios híbridos con superficies frías. En todos los casos, la eficacia está modulada por el contexto: densidad, patrón de impermeabilización, morfología del cañón urbano y régimen de vientos.

La escalabilidad requiere gobernanza, mantenimiento y gestión hídrica acordes al ciclo de vida de la vegetación. Selección de especies tolerantes a calor y sequía, estrategias de riego eficientes y estándares de monitoreo comparables son condiciones habilitantes para sostener el desempeño térmico en el tiempo, particularmente durante periodos críticos. Finalmente, orientar la expansión de redes verdes con criterios de justicia térmica y co-beneficios ecosistémicos maximiza el retorno social y fortalece la legitimidad de la inversión, permitiendo transitar de intervenciones aisladas a sistemas urbanos resilientes y habitables.

Referencias bibliográficas

- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Gasparri, A., et al. (2023). Cooling cities through urban green infrastructure: a health impact assessment. *The Lancet*, 401(10380), 135–146.
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and blue-space to mitigate urban heat island intensity. *Science of the Total Environment*, 584–585, 1040–1055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>
- Iungman, T., Cirach, M., Marando, F., Pereira Barboza, E., Khomenko, S., Masselot, P., Quijal-Zamorano, M., Mueller, N., Gasparri, A., Urquiza, J., Heris, M., Thondoo, M., & Nieuwenhuijsen, M. (2023). Cooling cities through urban green infrastructure: a health impact assessment of European cities. *The Lancet*, 401(10376), 577–589. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)02585-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)02585-5)
- Kong, F., Yin, H., James, P., Hutya, L. R., & He, H. S. (2014). Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China. *Landscape and Urban Planning*, 128, 35–47.
- Marando, F., Heris, M. P., Zulian, G., Moneo-Lain, A., Mentaschi, L., Chrysoulakis, N., Parastatidis, D., & Maes, J. (2021). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 74, 103564. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103564>
- McPherson, E. G., van Doorn, N., & de Goede, J. (2016). Structure, function and value of street trees in California, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 17, 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.03.013>
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Rahman, M. A., Moser, A., Rötzer, T., & Pauleit, S. (2021). A single tree model to consistently simulate cooling, shading, and dry deposition in urban environments under drought. *International Journal of Biometeorology*, 64(3), 451–465. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02030-8>
- 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>
- Vahmani, P., & Ban-Weiss, G. (2016). Climatic consequences of adopting drought-tolerant vegetation over Los Angeles: The role of irrigation in changing urban climate. *Geophysical Research Letters*, 43(15), 8240–8249. <https://doi.org/10.1002/2016GL069658>

- Wang, C., Ren, Z., Dong, Y., Zhang, P., Guo, Y., Wang, W., & Bao, G. (2022). Efficient cooling of cities at global scale using urban green space to mitigate urban heat island effects in different climatic regions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127635. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127635>
- Ziter, C. D., Pedersen, E. J., Kucharik, C. J., & Turner, M. G. (2019). Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7575–7580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817561116>